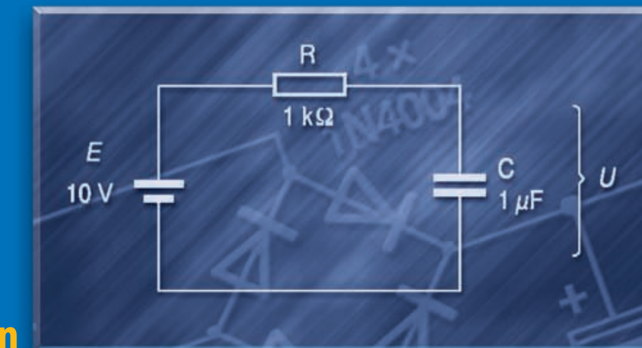


L'USINE NOUVELLE

Pierre Mayé

Aide-mémoire

Composants électroniques



3e édition

DUNOD

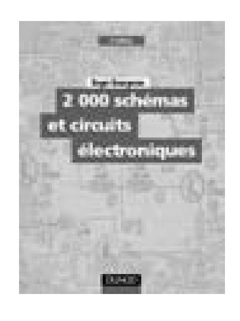
Aide-mémoire

Composants électroniques

CHEZ LE MÊME ÉDITEUR



Bogdar Grabowski
Aide-mémoire d'électronique,
528 p.



Roger Bourgeron
2000 schémas et circuits électroniques,
600 p.



Hermann Schreiber
L'électronique par la schéma,
416 p.

Pierre Mayé

Aide-mémoire

Composants électroniques

3e édition



DU MÊME AUTEUR

Les Infrarouges en électronique, Dunod, 2003
Optoélectronique industrielle, Dunod, 2001
Moteurs électroniques, Dunod, 2001
Les Alimentations électroniques, Dunod, 2001
L'Électronique par l'expérience, Dunod, 2000

Illustrations : Alain et Ursula BOUTEVEILLE

ISBN 2 10 048885 6

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION

Bien connaître les composants est une condition nécessaire à la conception et à la réalisation des montages électroniques. Cet ouvrage permet au débutant d'acquérir quelques solides notions sur les composants les plus répandus. On y trouve les principes et les caractéristiques technologiques, mais aussi des indications sur les applications les plus fréquentes. On peut se servir de ce livre pour s'initier aux différents composants électroniques, mais c'est également un petit aide-mémoire à consulter lorsque cela est nécessaire.

CHAPITRE 1

RÉSISTANCES ET POTENTIOMÈTRES

Très visibles grâce à leurs anneaux de différentes couleurs, les résistances sont des composants que l'on remarque tout de suite sur pratiquement toutes les cartes électroniques. Malgré leur comportement extrêmement simple, les résistances restent les éléments les plus répandus de l'électronique.

1.1 Principe et propriétés

Loi d'Ohm

Une résistance est un dipôle (composant à deux bornes) tel que la tension U à ses bornes est proportionnelle au courant I qui le traverse (loi d'Ohm) :

$$U = RI$$

Le coefficient de proportionnalité R est appelé résistance du dipôle. Une ambiguïté existe en français puisque l'on désigne par le même mot l'objet et un nombre R qui le caractérise. La langue anglaise évite ce problème en désignant l'élément par *resistor* et le nombre par *resistance*. Ce coefficient R chiffre la plus ou moins grande difficulté que rencontre le courant électrique pour traverser le dipôle.

L'unité de résistance est l'ohm (symbole Ω), du nom du physicien allemand G. S. Ohm qui a étudié les lois des circuits électriques. Devant la diversité des valeurs des résistances, on emploie les multiples et éventuellement les sous-multiples de l'ohm. Les correspondances sont données dans le *tableau 1.1*.

Tableau 1.1 – Multiples et sous-multiples de l'ohm.

Nom	Symbole	Valeur en Ω
Milliohm	mΩ	0,001
Kilo-ohm	kΩ	1 000
Mégohm	MΩ	1 000 000

Pour les composants électroniques, on utilise surtout le kilo-ohm et le mégohm. Le milliohm apparaît seulement pour chiffrer des résistances parasites comme les résistances de contact. Les fils de liaison dans les montages électroniques sont des conducteurs de très faible résistance. On peut en général considérer que la tension à leurs bornes est négligeable quel que soit le courant qui les traverse : tout se passe comme si la résistance était nulle, on dit qu'il s'agit d'un court-circuit.

Résistivité

La résistance dépend à la fois des dimensions du conducteur et de sa nature. Par exemple, la résistance d'un fil (*figure 1.1*) est proportionnelle à sa longueur l et inversement proportionnelle à sa section s :

$$R = \rho \frac{l}{s}$$

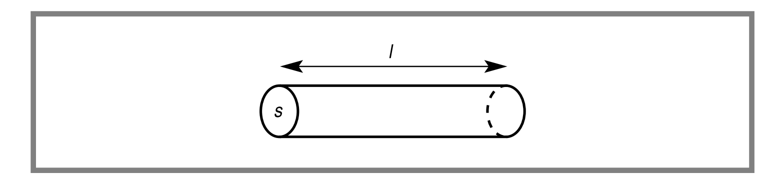


Figure 1.1 – Résistance d'un fil conducteur.

Le coefficient ρ est caractéristique d'un matériau donné et se nomme résistivité. L'unité de résistivité est l'ohm-mètre (symbole Ω·m) puisque *l* s'exprime en mètres et *s* en mètres carrés.

Effet Joule

Un phénomène important dans une résistance est l'effet Joule (du nom d'un physicien anglais qui a étudié les lois de la chaleur). Une résistance parcourue par un courant consomme une énergie électrique et la transforme en chaleur. La puissance correspondante (qui correspond à un débit d'énergie) s'exprime par l'une des trois formules, équivalentes grâce à la loi d'Ohm :

$$P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R}$$

L'unité de puissance est le watt (symbole W). On emploie assez souvent en électronique son sous-multiple, le milliwatt (mW) qui vaut 0,001 W. La puissance dissipée par effet Joule dans un composant est un problème important en électronique. Tout d'abord, il s'agit d'une puissance perdue pour le circuit électrique et qui doit donc lui être fournie (en général par une source de tension continue), et ensuite, il se pose souvent un problème d'évacuation de la chaleur créée car les petites dimensions des montages rendent difficiles les échanges thermiques. Ces questions se posent essentiellement pour les montages qui traitent des courants assez élevés comme les amplificateurs de puissance ou les alimentations.

Symboles

Sur les schémas, les résistances sont représentées par leur symbole normalisé (*figure 1.2*) ou souvent par un autre symbole (*figure 1.3*).

Associations de résistances

Association en série

On peut brancher deux résistances R_1 et R_2 en série (*figure 1.4*).

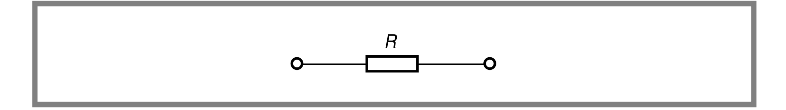


Figure 1.2 – Symbole normalisé d'une résistance.

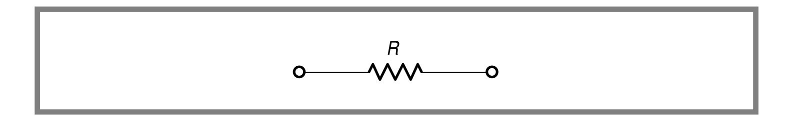


Figure 1.3 – Symbole courant d'une résistance.

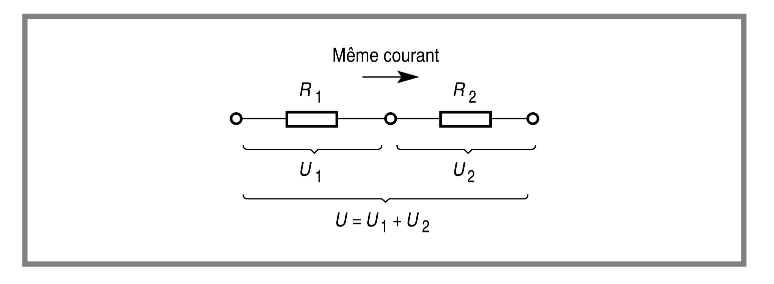


Figure 1.4 – Association de deux résistances en série.

Le courant est le même dans les deux éléments, mais les tensions à leurs bornes s'ajoutent. Une double application de la loi d'Ohm montre que le dipôle résultant se comporte comme une résistance dont la valeur est :

$$R = R_1 + R_2$$

Cette loi peut se généraliser à plusieurs conducteurs en série :

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots$$

Association en parallèle

Le deuxième mode d'association de résistances est le branchement en parallèle (*figure 1.5*).

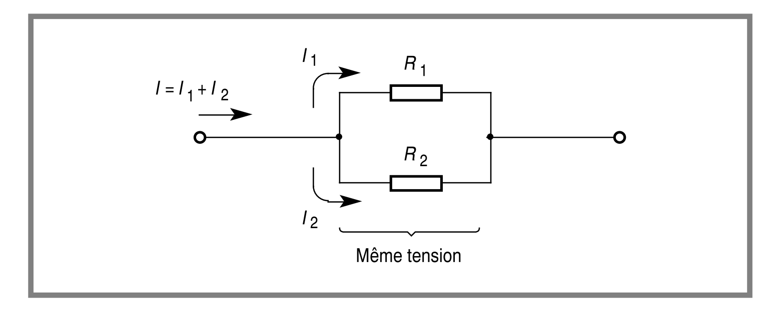


Figure 1.5 – Association de deux résistances en parallèle.

La tension est la même pour les deux éléments, mais les courants qui les traversent s'ajoutent. On a ici, grâce à la loi d'Ohm :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Pour plusieurs résistances, on a de même :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

Dans le cas de deux résistances, on peut facilement obtenir R par la formule :

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Cas des résistances de même valeur

Un cas particulier intéressant est celui où les résistances sont identiques : deux résistances en série donnent une résistance de valeur double et deux résistances en parallèle équivalent à une résistance de valeur moitié.

1.2 Caractéristiques technologiques (résistances fixes)

Précision

Le nombre indiqué sur le composant est la valeur nominale de la résistance. Du fait des tolérances de fabrication, la résistance réelle est un peu différente. Les constructeurs donnent une fourchette dans laquelle peut se trouver cette valeur. L'intervalle est défini par un pourcentage de la résistance nominale qui indique l'écart maximal, en plus ou en moins, qu'il peut y avoir entre la valeur réelle et la valeur nominale.

Par exemple, un composant marqué 10 kΩ, 5 % peut avoir une résistance réelle comprise entre 9,5 kΩ et 10,5 kΩ puisque 5 % de 10 kΩ correspond à un écart possible de 0,5 kΩ.

Valeurs normalisées

Du fait de la tolérance qui existe sur les valeurs de résistances, il est inutile de disposer d'un trop grand nombre de composants différents. En effet, avec l'exemple précédent, on voit que la valeur nominale 10,5 kΩ ne servirait à rien puisqu'une résistance réelle de ce type pourrait être identique à un élément marqué 10 kΩ.

Ainsi, on ne fabrique que des résistances de certaines valeurs, appartenant à des séries normalisées conçues de telle façon qu'il y ait tout juste recouvrement des intervalles possibles pour les valeurs réelles correspondant à des valeurs nominales consécutives.

Par exemple, dans la série de précision 5 %, la valeur qui suit 10 kΩ est 11 kΩ. La résistance minimale que peut atteindre le composant marqué 11 kΩ est 10,45 kΩ (l'écart par rapport à la valeur nominale est 5 % de 11 kΩ, soit 0,55 kΩ). Le recouvrement n'intervient qu'entre 10,45 kΩ et 10,5 kΩ, ce qui est pratiquement négligeable. À chaque tolérance correspond une série normalisée. Le *tableau 1.2* donne les différentes progressions utilisées. Les séries sont désignées par E6, E12… On indique ainsi le nombre de valeurs dans une décade (par exemple entre 10 et 100, 100 non compris). Le tableau fournit les valeurs comprises entre 10 et 100, mais il suffit d'ajouter ou de retrancher des zéros pour obtenir toutes les résistances possibles.

Tableau 1.2 – Valeurs normalisées.

Progressions	Tolérances	Séries normalisées
E3		10 22 47
E6	± 20 %	10 15 22 33 47 68
E12	± 10 %	10 12 15 18 22 27 33 39 47 56 68 82
E24	± 5 %	10 11 12 13 15 16 18 20 22 24 27 30 33 36 39 43 47 51 56 62 68 75 82 91
E48	± 2 %	100 105 110 115 121 127 133 140 147 154 162 169 178 187 196 205 215 226 237 249 261 274 287 301 316 332 348 365 383 402 422 442 464 487 511 536 562 590 619 649 681 715 750 787 825 866 909 953
E96	± 1 %	100 102 105 107 110 113 115 118 121 124 127 130 133 137 140 143 147 150 154 158 162 165 169 174 178 182 187 191 196 200 205 210 215 221 226 232 237 243 249 255 261 267 274 280 287 294 301 309 316 324 332 340 348 357 365 374 383 392 402 412 422 432 442 453 464 475 487 499 511 523 536 549 562 576 590 604 619 634 649 665 681 698 715 732 750 768 787 806 825 845 866 887 909 931 953 976

Les composants courants ont une tolérance de 5 % et même de 10 % pour les expérimentations ordinaires. On fait parfois appel à des résistances de précision, en général à 1 % ou à 2 %.

Pour des applications spécifiques (étalonnages), on trouve des éléments très précis : 0,1 % par exemple.

Les résistances sont normalement disponibles entre quelques dixièmes d'ohm et quelques dizaines de mégohms, mais les valeurs courantes ne descendent pas en dessous de quelques ohms et ne vont pas au-delà de quelques mégohms.

Marquage

Les résistances sont en général identifiées par différents anneaux de couleur tracés sur le corps du composant qui indiquent la valeur nominale et la tolérance. Les éléments ordinaires (5 % ou 10 %) comportent quatre anneaux (*figure 1.6*) tandis que les éléments de précision (1 % ou 2 %) en ont cinq (*figure 1.7*).

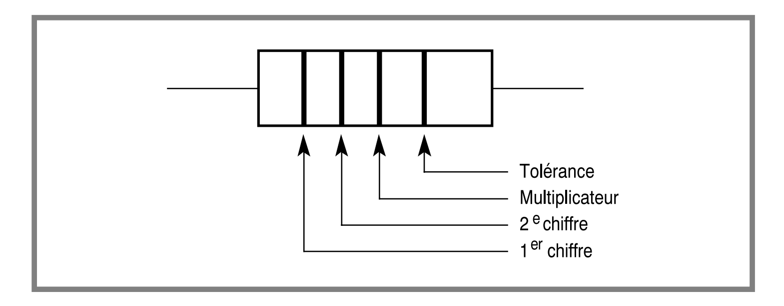


Figure 1.6 – Marquage d'une résistance à 5 % ou 10 %.

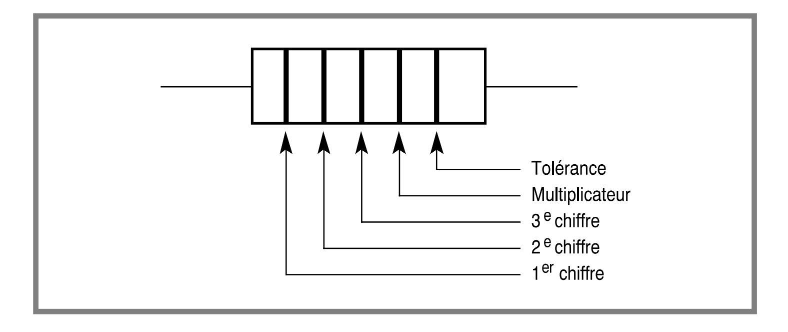


Figure 1.7 – Marquage d'une résistance à 1 % ou 2 %.

Chaque couleur correspond à un chiffre, ainsi qu'il est indiqué dans le *tableau 1.3*. Il faut faire attention au sens de lecture : le dernier anneau est un peu séparé des autres.

Tableau 1.3 – Code des couleurs pour le marquage des résistances.

Couleur	1er chiffre	2e chiffre	3e chiffre (éventuel)	Multiplicateur	Tolérance
Argent				× 0,01 Ω	10 %
Or				× 0,1 Ω	5 %
Noir		0	0	× 1 Ω	20 %
Marron	1	1	1	× 10 Ω	1 %
Rouge	2	2	2	× 100 Ω	2 %
Orange	3	3	3	× 1 kΩ	
Jaune	4	4	4	× 10 kΩ	
Vert	5	5	5	× 100 kΩ	
Bleu	6	6	6	× 1 MΩ	
Violet	7	7	7		
Gris	8	8	8		
Blanc	9	9	9		

Considérons un premier exemple (*figure 1.8*). Les deux premiers anneaux indiquent les chiffres significatifs de la valeur nominale de la résistance : jaune correspond à 4 et violet à 7. Le troisième anneau définit le multiplicateur : orange signifie × 1 kΩ. La résistance nominale est donc 47 kΩ. La précision est donnée par le quatrième anneau : or correspond à 5 %.

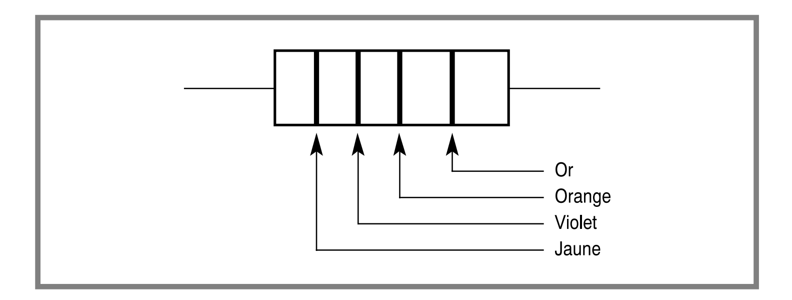


Figure 1.8 – Exemple de marquage : résistance 47 kΩ, 5 %.

Prenons un autre exemple (*figure 1.9*). Il s'agit d'une résistance de précision puisque son marquage comporte cinq bandes. Les trois premières indiquent les chiffres significatifs de la valeur nominale : blanc, orange et marron, soit 931. La quatrième bande donne le multiplicateur : noir signifie × 1 Ω. La résistance nominale est donc 931 Ω. La tolérance est indiquée par le dernier anneau : marron pour 1 %.

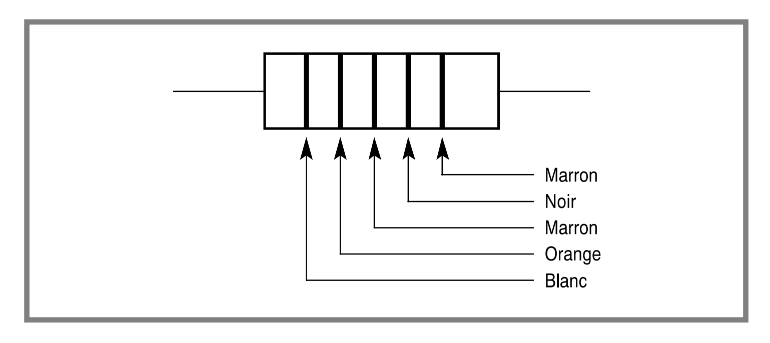


Figure 1.9 – Exemple de marquage : résistance 931 Ω, 1%.

Puissance maximale

Comme on l'a dit plus haut, une résistance dissipe une certaine puissance sous forme thermique : c'est l'effet Joule. Pour un composant donné, il existe une limite technologique de dissipation. Si l'on dépasse cette puissance maximale autorisée, l'élément risque de se dégrader : sa résistance est modifiée sans que cela change forcément l'aspect du composant. Si la limite est fortement dépassée, la résistance noircit et peut même se détruire. Les résistances ordinaires ont une puissance maximale de $^1/_4$ W. On utilise également des résistances de puissance supérieure lorsque c'est nécessaire : $^1/_2$ W, 1 W, 2 W, 5 W. Les éléments de puissance sont nettement plus encombrants sur les circuits imprimés et évidemment plus chers. Il importe donc de chiffrer correctement la puissance nécessaire afin d'utiliser ces composants à bon escient. On peut employer une des trois formules citées plus haut. Par exemple, on branche une résistance de 4,7 kΩ sous une tension continue de 12 V. La puissance dissipée par effet Joule est alors :

$$P = \frac{12^2}{4\,700} = 0{,}03 \text{ W}$$

Une résistance $^1/_4$ W convient parfaitement. Sous la même tension de 12 V, on connecte un élément de 470 Ω. La puissance est dans ce cas :

$$P = \frac{12^2}{470} = 0{,}3 \text{ W}$$

Une dissipation de $^1/_4$ W est insuffisante. Il faut au moins $^1/_2$ W. On voit que l'on a intérêt à choisir des résistances de valeurs élevées lorsque c'est possible : les puissances dissipées restent alors faibles.

Technologies

De nombreuses technologies existent pour la fabrication des résistances, mais seules quelques-unes apparaissent fréquemment.

Les résistances à couche de carbone sont de loin les plus répandues. Elles sont destinées à tous les usages courants. Leurs performances sont correctes et leur prix est faible. On les rencontre dans des gammes de précision moyenne : 5 % par exemple. La dissipation maximale peut aller jusqu'à 2 W (on trouve essentiellement $^1/_4$ W, $^1/_2$ W, 1 W et 2 W). Ces résistances sont toujours marquées par le code des couleurs. En l'absence d'indication contraire, les résistances rencontrées sur les schémas sont à couche de carbone.

Les résistances à couche métallique ont des caractéristiques supérieures, mais leur prix est un peu plus élevé. Elles sont destinées aux applications professionnelles et elles prennent une part croissante du marché. Leur précision est bonne : parfois 5 %, mais aussi 2 % ou 1 %. Ces résistances ont une bonne stabilité (c'est-à-dire que leur valeur ne se modifie pas beaucoup au cours du temps). Certaines fabrications de ce type sont même à haute stabilité. La dissipation maximale peut aller jusqu'à 1 W ou 2 W. Le marquage est parfois effectué avec le code des couleurs, mais les séries de précision sont souvent marquées en clair : la valeur et la tolérance sont indiquées en chiffres sur le corps du composant (par exemple 1 kΩ ± 1%).

Pour des puissances plus élevées, on dispose de résistances bobinées. On rencontre différentes présentations suivant les puissances et les performances : résistances moulées, vitrifiées… Les dissipations sont de quelques watts, quelques dizaines de watts ou plus. Le marquage est en clair. Les tolérances sont assez moyennes (10 %, 5 %…) bien qu'il existe des séries de bonne précision, mais à des prix élevés. Les résistances bobinées d'usage courant ne sont pas utilisables aux hautes fréquences car elles sont inductives.

1.3 Résistances variables

Potentiomètres de réglage

Ces éléments sont utilisés lorsque l'on veut pouvoir régler manuellement un paramètre électrique de façon régulière. Ils sont en général constitués d'un axe relié à un curseur qui se déplace sur une piste de

carbone de forme circulaire. On trouve les potentiomètres courants dans la série E3 (valeurs 1 ; 2,2 ; 4,7) avec une tolérance de 20 %. Les valeurs s'échelonnent entre 100 Ω et 4,7 MΩ. La puissance est couramment de $^1/_4$ W et peut parfois aller jusque 1 W. Le plus souvent la loi de variation est linéaire, c'est-à-dire que la résistance comprise entre le curseur et une extrémité du potentiomètre est proportionnelle à la rotation de l'axe, mais on trouve aussi des lois non linéaires pour des applications particulières : la loi logarithmique est notamment employée en audio. Enfin, le potentiomètre peut être éventuellement muni d'un interrupteur.

On utilise aussi parfois des potentiomètres à glissière, notamment sur certains appareils audio. La piste de carbone est rectiligne au lieu d'être circulaire. Le curseur se déplace simplement en translation le long d'une glissière.

Pour des puissances plus élevées, on trouve des potentiomètres bobinés. Les dissipations sont de quelques watts ou quelques dizaines de watts, parfois plus. Les valeurs sont en général celles de la série E3.

Lorsqu'une grande précision de réglage est nécessaire, on fait appel à des potentiomètres multitours. L'axe commande une vis à faible pas. On y adapte éventuellement un bouton compte-tours qui permet de bien repérer une valeur de réglage. Ces composants sont évidemment d'un coût beaucoup plus élevé que les résistances variables ordinaires et leur emploi est limité.

Résistances ajustables

Ces composants sont ajustés à la construction de l'appareil ou lors de réglages occasionnels, mais ne font pas l'objet d'un usage régulier. Les résistances ajustables sont formées d'un curseur qui frotte sur une piste de carbone, mais ne possèdent pas d'axe. Il faut se munir d'un tournevis pour les actionner. De faible encombrement sur les circuits imprimés (souvent 1 cm), les ajustables sont disponibles en deux versions : l'une à câbler horizontalement (solution la moins fragile), l'autre à câbler verticalement (solution la moins encombrante). Les valeurs s'échelonnent entre 100 Ω et

4,7 MΩ, en série E3. La dissipation maximale est de $^1/_{10}$ W pour les petits modèles, $^1/_4$ W pour des composants un peu plus grands.

Pour les applications professionnelles, on trouve des composants de meilleures performances (par exemple les ajustables Cermet). Enfin, lorsqu'une bonne précision de réglage est nécessaire, on fait appel à des ajustables multitours (parfois appelés trimmers). Une vis micrométrique permet de déplacer le curseur sur une piste rectiligne. Cette vis doit être manœuvrée par un petit tournevis. On rencontre souvent des ajustables 10 tours, mais d'autres modèles sont disponibles. Leur prix est toutefois assez élevé.

1.4 Domaines d'utilisation

Il est difficile de donner une liste exhaustive des usages possibles pour les résistances et les potentiomètres. On rencontre en effet ces composants dans pratiquement tous les montages électroniques, dans des configurations très diverses. Les résistances sont souvent associées à d'autres éléments, aussi de nombreux exemples apparaîtront dans les chapitres suivants à propos des applications de divers composants. On peut toutefois essayer de comprendre le rôle des résistances dans différents cas.

Une résistance établit une relation de proportionnalité entre un courant et une tension : c'est la loi d'Ohm. Si l'on applique une tension constante aux bornes d'une résistance, on fixe le courant qui la traverse (*figure 1.10*).

Par exemple, on a branché une résistance de 10 kΩ aux bornes d'une source de tension continue de 10 V. Le courant qui parcourt la maille est :

$$I = \frac{10}{10\,000} = \frac{1}{1\,000}\ \text{A} \quad \text{soit} \quad 1\ \text{mA}$$

On a effectué la conversion d'une tension en un courant. La fonction inverse est elle aussi possible : on peut convertir un courant en une tension. Un exemple d'application est rencontré dans un

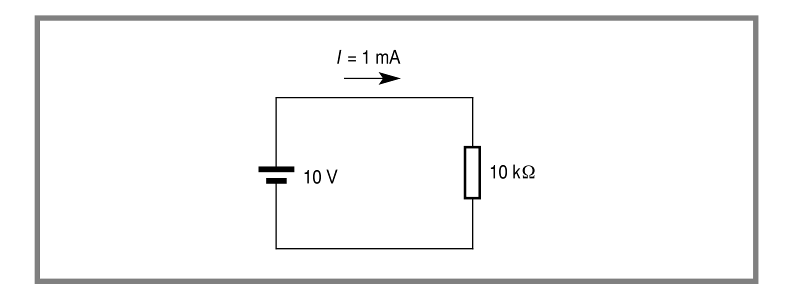


Figure 1.10 – Résistance soumise à une tension constante.

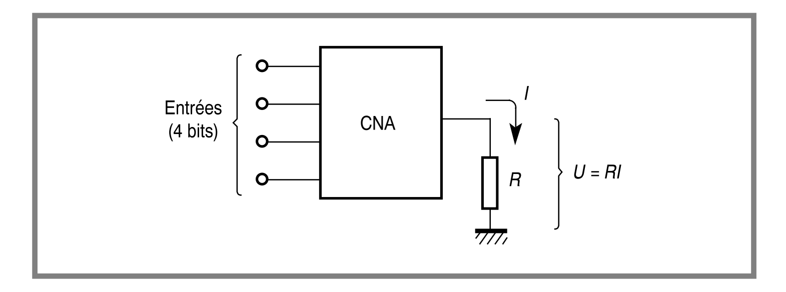


Figure 1.11 – Conversion du courant de sortie d'un CNA en tension.

convertisseur numérique/analogique (CNA) : c'est un circuit qui permet d'obtenir un courant dépendant de l'état logique de différentes entrées (*figure 1.11*).

Ainsi, pour un convertisseur 4 bits pour lequel toutes les entrées sont à l'état logique 1, on a :

$$I = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \frac{1}{16}\right) I_0$$

I_0 est une constante fixée dans le montage. Par exemple, avec I_0 = 1 mA, on obtient :

$$I = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \frac{1}{16}\right) \times 1 = \frac{15}{16} = 0{,}94 \text{ mA}$$

Si la résistance *R* vaut 10 kΩ, on a une tension égale à :

$$U = 10 \times 0{,}94 = 9 \text{ V}$$

Pour une autre valeur des bits d'entrée, on a une autre expression du courant de sortie et donc une autre tension. Par exemple, si le premier bit (celui de plus fort poids) est à 1 et les autres à 0, on obtient :

$$I = \left(\frac{1}{2} + \frac{0}{4} + \frac{0}{8} + \frac{0}{16}\right) \times 1 = 0{,}5 \text{ mA}$$

$$U = 10 \times 0{,}5 = 5 \text{ V}$$

Les résistances sont aussi associées aux composants à semi-conducteurs (diodes, transistors…) pour les polariser, c'est-à-dire pour fixer la position de leur point de repos (tension et courant). L'exemple le plus simple est celui de la diode (*figure 1.12*).

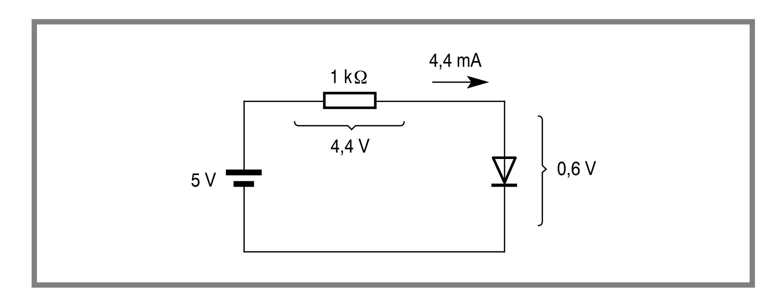


Figure 1.12 – Polarisation d'une diode.

Cet élément, lorsqu'il est dans l'état passant, maintient une tension pratiquement constante à ses bornes (environ 0,6 V pour une diode au silicium). Dans le circuit considéré, la diode est polarisée par un générateur de tension 5 V. La tension aux bornes de la résistance est :

$$U = 5 - 0{,}6 = 4{,}4 \text{ V}$$

Le courant qui traverse le circuit est alors :

$$I = \frac{4{,}4}{1} = 4{,}4 \text{ mA}$$

On remarque que dans les applications numériques, on a pris comme unités le volt pour les tensions, le milliampère pour les courants et le kilo-ohm pour les résistances. Cela ne change rien à la loi d'Ohm puisque le milliampère vaut un millième d'ampère tandis que le kilo-ohm correspond à mille ohms. Ces unités correspondent mieux aux ordres de grandeur rencontrés en électronique.

La résistance peut aussi être employée avec des tensions et des courants variables. Dans ce cas, la loi d'Ohm s'applique à chaque instant et donc tension et courant ont même forme. Par exemple, une résistance de 10 kΩ est soumise à une tension triangulaire d'amplitude 10 V (*figure 1.13*).

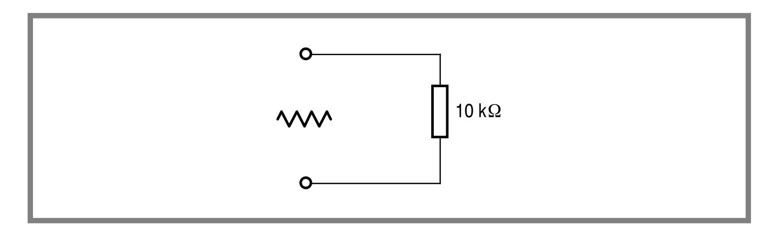


Figure 1.13 – Résistance soumise à une tension variable.

Le courant est lui aussi triangulaire (*figure 1.14*) et son amplitude est 1 mA.

On utilise aussi la loi d'Ohm pour les valeurs efficaces. Par exemple, une résistance de 100 Ω branchée sur le secteur est parcourue par un courant sinusoïdal dont la valeur efficace est :

$$I_{eff} = \frac{220}{100} = 2{,}2 \text{ A}$$

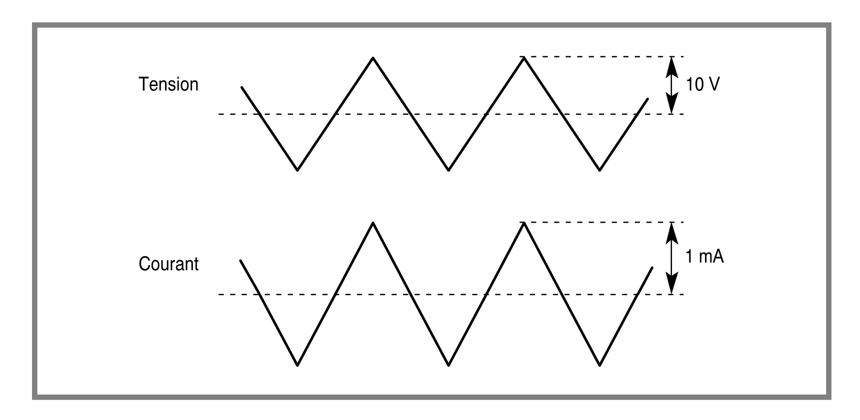


Figure 1.14 – Tension et courant variables.

Une configuration particulière très souvent employée est le diviseur résistif (*figure 1.15*).

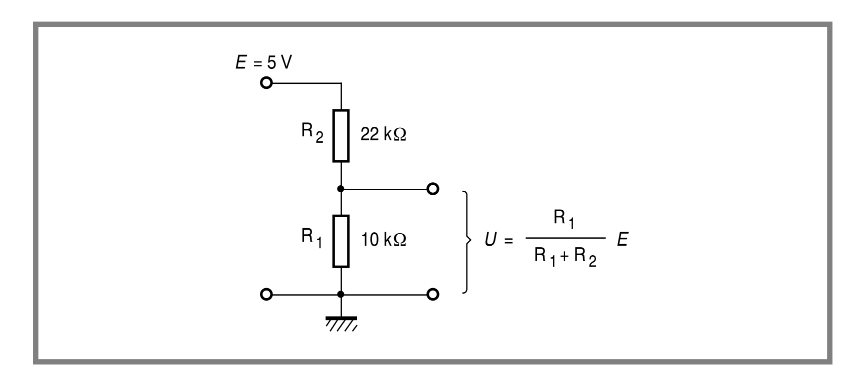


Figure 1.15 – Diviseur résistif.

Ce montage permet d'obtenir une tension inférieure à la tension d'alimentation (ou à une autre tension dont on dispose déjà). L'application de la loi d'Ohm montre immédiatement que l'on a :

$$U = \frac{R_1}{R_1 + R_2} E$$

Avec les valeurs choisies sur le schéma (R_1 = 10 kΩ et R_2 = 22 kΩ), on obtient :

$$U = \frac{10}{10 + 22} \times 5 = 1,56 \text{ V}$$

Cette formule est très commode, mais il faut faire attention à l'utiliser à bon escient. Son application suppose que le circuit est à vide, c'est-à-dire en fait que le courant débité est négligeable. Si ce n'est pas le cas, le courant dérivé dans la charge modifie le résultat. Pour s'en convaincre, il suffit de considérer une charge résistive (*figure 1.16*).

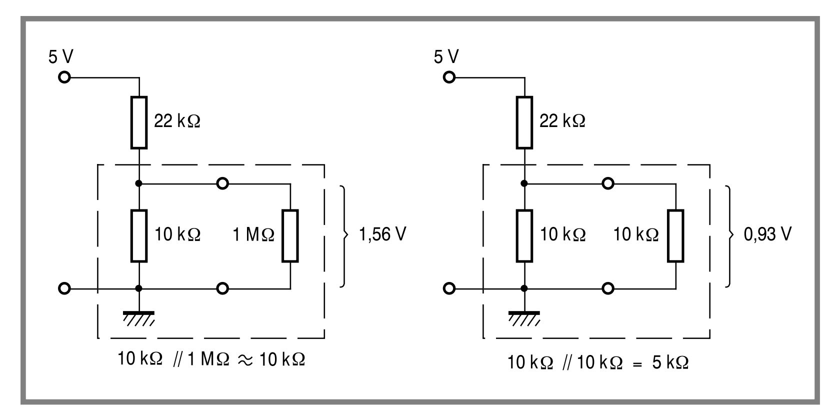


Figure 1.16 – Charge du diviseur résistif.

À la place de la résistance R_1, on a maintenant l'association en parallèle de R_1 et de la charge. Si la résistance de charge est élevée devant R_1 (par exemple 1 MΩ), la résistance équivalente à l'association est :

$$R = \frac{10 \times 1\,000}{10 + 1\,000} = 9,9 \text{ k}\Omega \approx 10 \text{ k}\Omega$$

Le résultat n'est pas modifié par l'arrivée de la charge. Par contre, si la résistance de charge n'est pas beaucoup plus grande que R_1 (par exemple 10 kΩ), la résistance équivalente à l'association en parallèle est différente de R_1 :

$$R = \frac{10 \times 10}{10 + 10} = 5\ \mathrm{k\Omega}$$

La tension obtenue est alors modifiée :

$$U = \frac{5}{5 + 22} \times 5 = 0{,}93\ \mathrm{V}$$

Il en sera ainsi quelle que soit la nature de la charge : la formule du diviseur résistif n'est valable que si le courant débité par le montage est négligeable. On choisit en général les valeurs des éléments pour qu'il en soit ainsi. Avec la précision habituelle des calculs, on peut estimer que la formule est valable si le courant dans R_1 et R_2 (appelé courant de pont) est supérieur à 10 fois le courant débité.

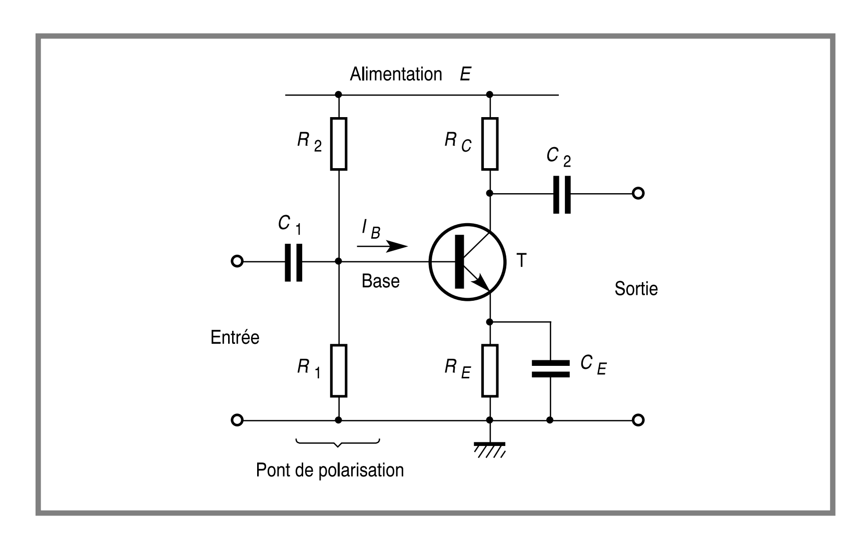


Figure 1.17 – Polarisation d'un amplificateur à transistor.

Un exemple typique d'application est le pont de polarisation de base d'un transistor bipolaire (*figure 1.17*).

On fixe la tension de base à partir de l'alimentation E à l'aide des résistances R_1 et R_2. Lorsque l'on a déterminé l'ordre de grandeur du courant de base I_B à l'aide des caractéristiques du transistor, on choisit un courant de pont égal à au moins $10I_B$, ce qui fixe la somme $R_1 + R_2$. La valeur de la tension de base désirée imposant le rapport de R_1 et R_2, ces deux résistances sont ainsi calculées.

On peut aussi obtenir plusieurs tensions échelonnées en utilisant un diviseur multiple (*figure 1.18*).

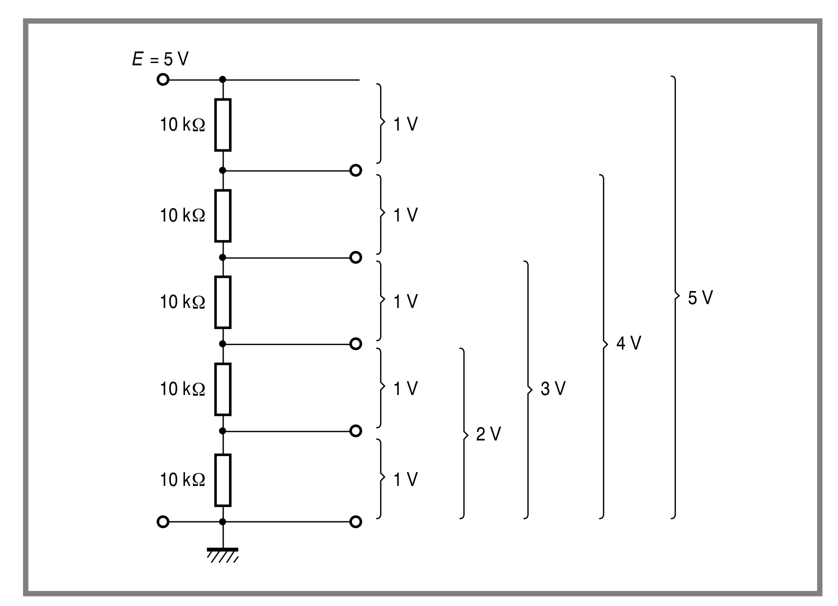


Figure 1.18 – Pont diviseur multiple.

En utilisant cinq résistances identiques de 10 kΩ sous une alimentation $E = 5$ V, on développe une tension de 1 V aux bornes de chaque élément. On dispose ainsi sur les prises intermédiaires de tensions 1 V, 2 V, 3 V, 4 V et 5 V par rapport à la masse.

Les résistances variables peuvent être montées de deux façons. Dans le montage en rhéostat, la résistance variable est en série avec la charge et permet de régler ainsi l'intensité (*figure 1.19*).

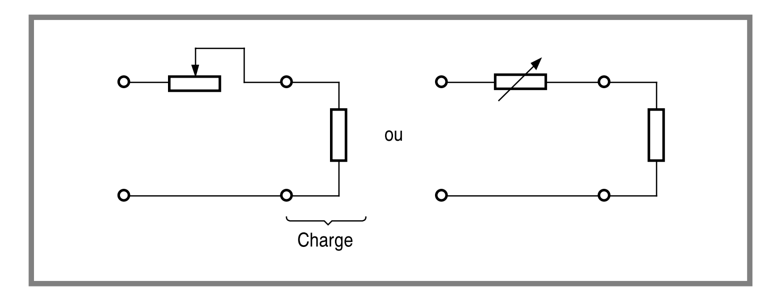


Figure 1.19 – Résistance variable montée en rhéostat.

Le montage en potentiomètre est un diviseur résistif où R_1 et R_2 sont variables, leur somme restant constante (*figure 1.20*).

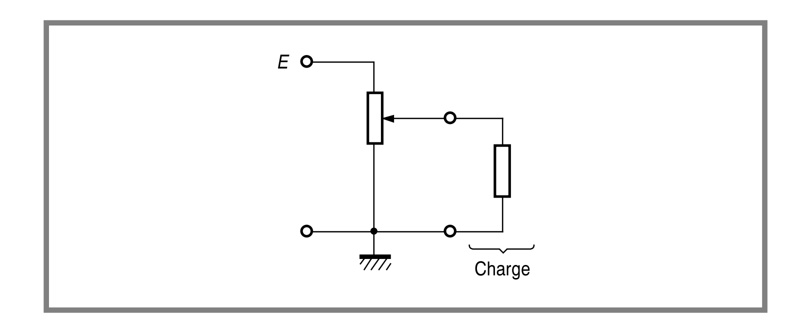


Figure 1.20 – Résistance variable montée en potentiomètre.

On réalise alors un réglage de tension entre 0 et *E*. Pour obtenir un réglage entre d'autres limites, on associe au potentiomètre des résistances talons (ou butées) (*figure 1.21*).

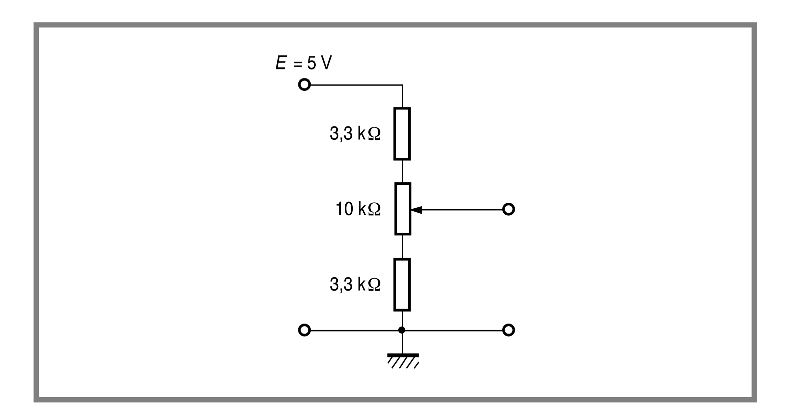


Figure 1.21 – Potentiomètre avec résistances talons.

Par exemple, on souhaite obtenir un réglage entre 1 V et 4 V avec une alimentation de 5 V. Il faut donc une tension de 3 V aux bornes du potentiomètre et de 1 V aux bornes de chaque résistance talon. Si l'on choisit un potentiomètre de 10 kΩ, il faut des résistances trois fois plus faibles (puisque le courant est le même dans les trois éléments), ce qui donne 3,3 kΩ. Cette valeur étant normalisée dans la série E12, on peut directement l'employer dans le montage.

Les résistances ajustables, comme leur nom l'indique, servent à ajuster un paramètre à la valeur désirée, par exemple pour compenser les écarts amenés par les imperfections des composants. Elles sont en général associées à une résistance fixe en série (*figure 1.22*).

Lors du choix des éléments, il faut tenir compte des tolérances qui existent sur les valeurs des résistances. Par exemple, sur le schéma proposé, on a utilisé une résistance fixe de 100 kΩ à 5 % et un ajustable de 100 kΩ à 10 %. La valeur réelle de la résistance peut être comprise entre 95 kΩ et 105 kΩ et la résistance totale du

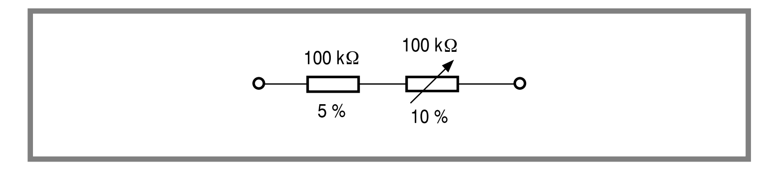


Figure 1.22 – Ajustage d'une résistance.

potentiomètre peut aller de 90 kΩ à 100 kΩ. Pour la limite inférieure de la résistance de l'ensemble, le cas le plus défavorable apparaît lorsque l'élément fixe est à son maximum (le potentiomètre est à 0). On a alors 105 kΩ. Pour la valeur maximale, dans le pire des cas, la résistance fixe est à son minimum, 95 kΩ, ainsi que la résistance totale du potentiomètre, à 90 kΩ, soit pour l'ensemble 185 kΩ. L'intervalle de réglage possible est, dans le cas le plus défavorable, de 105 kΩ à 185 kΩ.

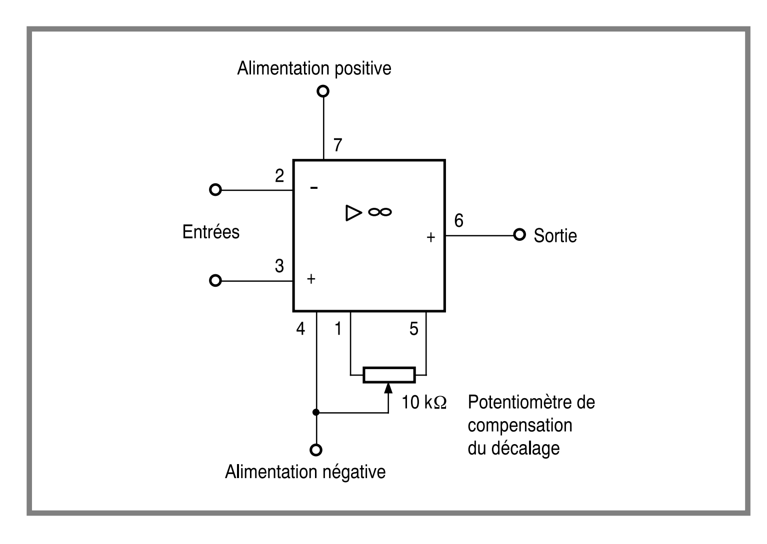


Figure 1.23 – Potentiomètre de compensation du décalage pour un amplificateur opérationnel 741 (boîtier DIL 8 broches).

On trouve aussi des ajustables associés à des circuits intégrés pour effectuer certains réglages. Par exemple, l'amplificateur opérationnel est souvent muni de bornes permettant la compensation du décalage (*offset*). La valeur du potentiomètre à utiliser et le mode de branchement dépendent du type de circuit choisi (*figure 1.23*).

Dans ce chapitre, nous avons cité quelques applications des résistances et des potentiomètres, mais nous n'avons fait qu'effleurer ce vaste sujet. Nous verrons dans les chapitres suivants d'autres emplois de ces éléments en association avec divers composants et nous aurons l'occasion de calculer et de choisir quelques résistances.

CHAPITRE 2

CONDENSATEURS

Moins nombreux que les résistances, les condensateurs sont cependant très répandus sur les circuits imprimés. À l'inverse des composants résistifs qui sont presque tous identiques, les condensateurs ont des formes et des encombrements très divers. Cela s'explique par les technologies variées qui conviennent aux différentes applications de ces éléments.

2.1 Principe et propriétés

Capacité

Un condensateur est formé de deux armatures métalliques séparées par un isolant, le diélectrique. Quand on applique une tension continue entre les bornes du condensateur (qui sont reliées aux armatures), des charges + et – vont s'accumuler les unes en face des autres de chaque côté de l'isolant. On dit que le condensateur s'est chargé. Si ensuite on ôte la source de tension et que l'on connecte le condensateur sur une résistance, les charges vont s'écouler jusqu'à leur annulation. Le condensateur se décharge. Il faut bien remarquer qu'aucun courant ne traverse le condensateur (à cause de l'isolant), mais qu'un certain courant circule dans le reste du circuit pendant une durée assez brève lors des charges et des décharges. On dit qu'il s'agit d'un régime de fonctionnement transitoire. Lorsqu'un condensateur est chargé, il conserve l'électricité accumulée jusqu'à une décharge : le condensateur a une certaine mémoire.

La quantité de charge Q emmagasinée sous une tension U donnée dépend du condensateur employé. Pour un composant choisi, la quantité de charge est proportionnelle à la tension appliquée à ses bornes. On écrit :

$$Q = CU$$

La constante C est caractéristique du condensateur. On l'appelle capacité et on l'exprime en farads (symbole F). On emploie plutôt les sous-multiples de cette unité : le microfarad (un millionième de farad), symbole µF, le nanofarad (un millième de microfarad), symbole nF et le picofarad (un millième de nanofarad), symbole pF. Le nom de farad vient du physicien anglais M. Faraday.

Énergie emmagasinée

Au point de vue énergétique, le comportement du condensateur est bien différent de celui de la résistance. Alors que cette dernière dissipe l'énergie électrique en la transformant en chaleur, le condensateur emmagasine l'énergie quand il se charge et la restitue lorsqu'il se décharge. Il n'y a pas de pertes d'énergie électrique (sauf de petits défauts dont l'importance est secondaire). Le condensateur chargé forme donc une réserve d'énergie. Ce phénomène est utilisé dans certaines applications comme on le verra plus loin.

Symbole

Sur les schémas, le condensateur est représenté par son symbole normalisé (*figure 2.1*).

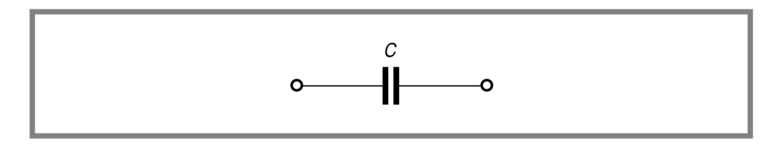


Figure 2.1 – Symbole normalisé d'un condensateur.

Certains condensateurs sont polarisés du fait de leur technologie : l'armature notée + doit alors absolument être reliée au pôle positif de la tension. On les identifie par leur symbole normalisé (*figure 2.2*) ou par d'autres représentations (*figure 2.3*).

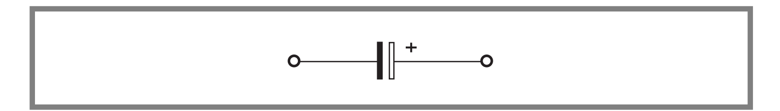


Figure 2.2 – Symbole normalisé d'un condensateur polarisé.

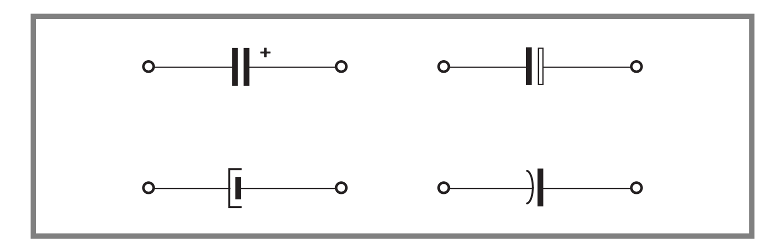


Figure 2.3 – Divers symboles employés pour représenter les condensateurs polarisés (l'armature + est celle de droite sur tous ces schémas).

Associations de condensateurs

On peut grouper les condensateurs en série ou en parallèle. L'association se comporte comme un nouveau condensateur. Pour deux éléments en série (*figure 2.4*), de capacités C_1 et C_2, on obtient un condensateur équivalent dont la capacité C est telle que :

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

On en déduit :

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

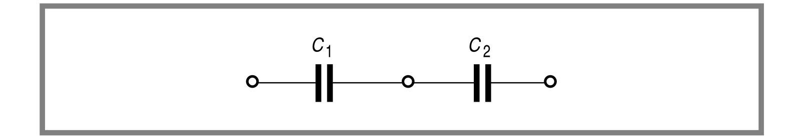


Figure 2.4 – Condensateurs en série.

Deux condensateurs de capacités C_1 et C_2 branchés en parallèle (*figure 2.5*) donnent un condensateur équivalent de capacité :

$$C = C_1 + C_2$$

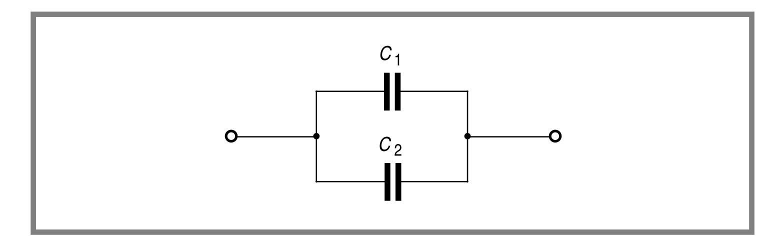


Figure 2.5 – Condensateurs en parallèle.

Les formules se généralisent facilement pour des groupements de plus de deux condensateurs.

REMARQUE

Les résultats sont différents de ceux qui ont été obtenus pour les résistances : pour des éléments en série, les résistances s'ajoutent tandis que ce sont les inverses des capacités qu'il faut considérer ; pour des éléments en parallèle, c'est le contraire.

On peut associer des condensateurs pour obtenir une capacité donnée, mais d'autres buts sont parfois recherchés. Par exemple, on ne dispose pas facilement de condensateurs non polarisés de fortes capacités. On peut simuler ces éléments par le groupement de deux condensateurs polarisés (*figure 2.6*).

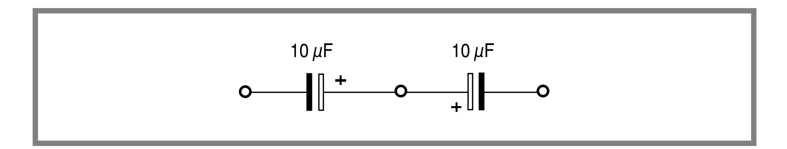


Figure 2.6 – Association équivalente à un condensateur non polarisé de 5 µF.

Évidemment, la capacité de l'association se calcule par la formule citée plus haut. Deux condensateurs polarisés de 10 µF simulent un élément non polarisé dont la capacité est :

$$C = \frac{10}{2} = 5\ \mu\text{F}$$

Un autre groupement est parfois rencontré en parallèle sur une ligne d'alimentation (*figure 2.7*).
Du fait des ordres de grandeur très différents choisis pour les deux capacités, on peut estimer que le petit condensateur non polarisé n'a aucune influence sur la capacité résultante qui est environ 100 µF.
En fait, le problème se pose autrement du fait des imperfections des condensateurs. Les éléments de forte capacité ont de mauvaises propriétés aux hautes fréquences (voir les notions de technologie un peu plus loin). On se sert donc du gros condensateur polarisé pour un fonctionnement aux fréquences basses et c'est le petit condensateur non polarisé qui prend le relais aux fréquences élevées.

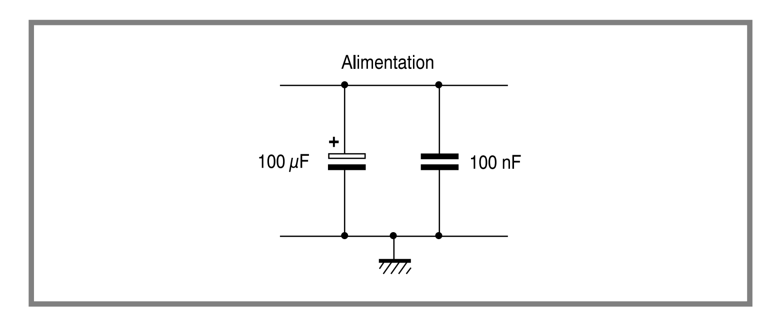


Figure 2.7 – Groupement de deux condensateurs agissant dans des domaines de fréquence différents.

Courbes de charge et de décharge

La charge la plus simple est obtenue quand le courant est constant. En effet, dans ce cas la tension U aux bornes du condensateur croît linéairement avec le temps t :

$$U = \frac{I}{C} t$$

Il faut cependant prendre garde au fait que cette formule ne s'applique que si le condensateur est totalement déchargé au départ (la tension est nulle à $t = 0$). On peut tracer la courbe représentant la tension U en fonction du temps t : on obtient une portion de droite (*figure 2.8*).

Le tracé a été fait pour un condensateur de capacité 1 µF chargé avec un courant constant de 1 mA. On utilise ce dispositif dans les générateurs de rampes et les générateurs de signaux triangulaires (la décharge étant alors aussi à courant constant).

Dans la plupart des applications, les condensateurs ne sont pas chargés à courant constant. Un générateur de tension continue E est branché en série avec une résistance R et le condensateur C (*figure 2.9*).

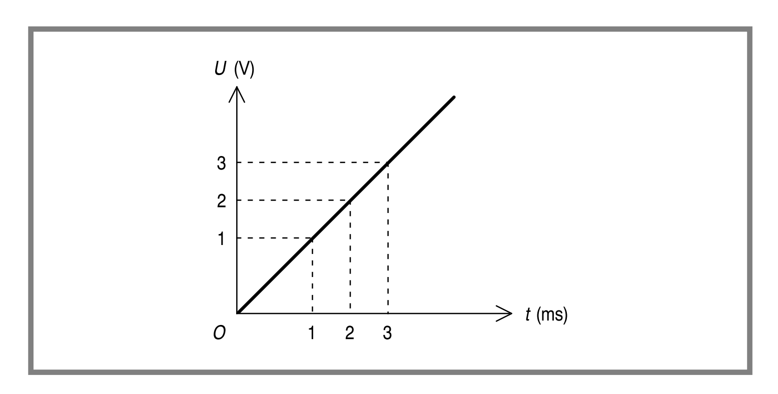


Figure 2.8 – Charge d'un condensateur à courant constant.

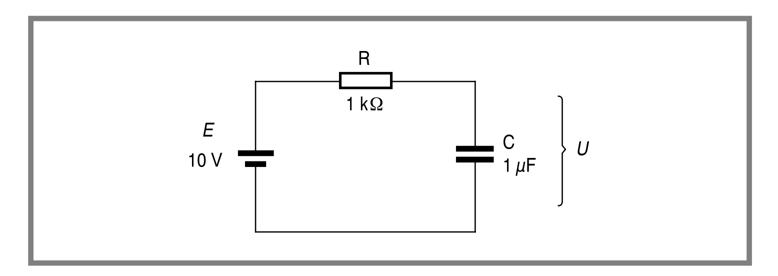


Figure 2.9 – Circuit de charge d'un condensateur par un générateur de tension et une résistance.

Si le circuit est fermé à $t = 0$, le condensateur étant complètement déchargé, l'évolution de la tension U se fait suivant une courbe (*figure 2.10*).

La charge commence assez rapidement puis se ralentit de plus en plus. Pour chiffrer la durée de la charge, on définit la constante de temps du circuit par :

$$\tau = RC$$

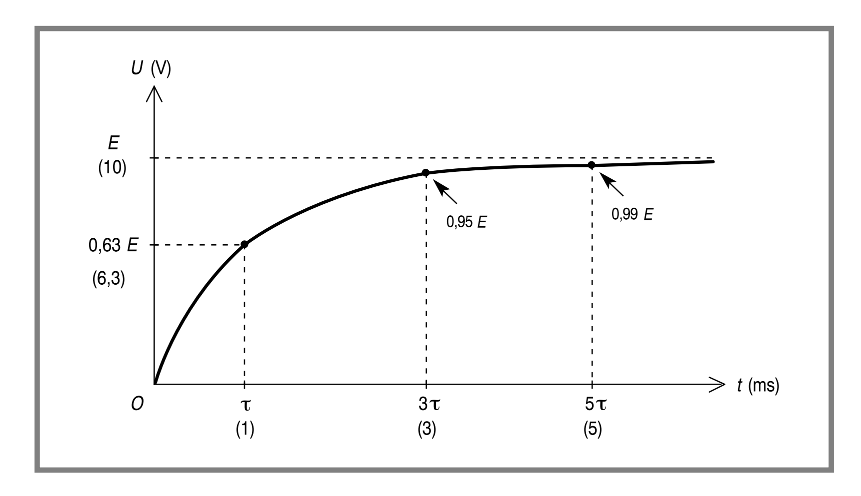


Figure 2.10 – Évolution de la tension aux bornes d'un condensateur chargé par un générateur de tension et une résistance.

Quelques valeurs remarquables sont données dans le *tableau 2.1*.

Tableau 2.1 – Valeurs remarquables pour la courbe de charge du condensateur.

t	***U***
τ	0,63*E*
3τ	0,95*E*
5τ	0,99*E*

Cette courbe est en fait une « exponentielle » dont l'équation mathématique est :

$$U = E\left(1 - e^{\frac{t}{\tau}}\right)$$

La notation e correspond à une fonction mathématique présente sur toutes les calculatrices scientifiques et notée en général EXP sur les claviers. Pour calculer la valeur de ce nombre, il suffit d'effectuer le quotient de la valeur de *t* choisie par τ, de changer le signe et d'appuyer sur la touche EXP.
La décharge du condensateur est obtenue en remplaçant le générateur E par un court-circuit (*figure 2.11*).

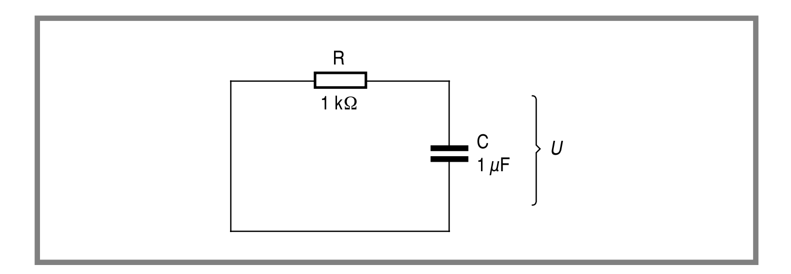


Figure 2.11 – Circuit de décharge du condensateur.

Il faut bien noter qu'il ne suffit pas d'ôter le générateur puisqu'alors, le circuit serait ouvert et le courant de décharge ne pourrait pas circuler. L'évolution de la tension aux bornes du condensateur est encore représentée par une courbe (*figure 2.12*).
Il suffit de renverser le tracé précédent pour l'obtenir. On a donc les valeurs particulières du *tableau 2.2*.

Tableau 2.2 – Valeurs remarquables pour la courbe de décharge du condensateur.

t	*U*
τ	0,37*E*
3τ	0,05*E*
5τ	0,01*E*

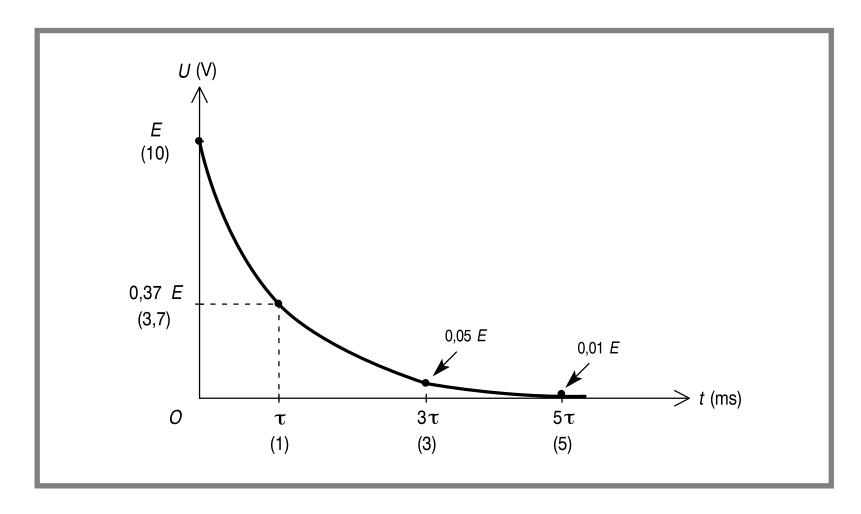


Figure 2.12 – Évolution de la tension aux bornes du condensateur lors de sa décharge.

On peut remarquer qu'une charge ou une décharge est pratiquement terminée au bout de quelques constantes de temps : au bout de 5τ, on atteint la valeur finale à 1 % près.
Les charges et décharges exponentielles sont utilisées dans de nombreux montages : astables, monostables…

Comportement en alternatif

Comme le courant alternatif change de sens périodiquement, les condensateurs se chargent et se déchargent sans arrêt. Ce mouvement continuel donne l'impression qu'un courant alternatif traverse le condensateur alors qu'aucune charge ne passe d'une armature à l'autre. En régime sinusoïdal à fréquence donnée, on constate deux choses :
– la tension et le courant sont en quadrature, c'est-à-dire sont déphasés de 90°, la tension étant en retard sur le courant (*figure 2.13*) ;

– la valeur efficace de la tension aux bornes du condensateur est proportionnelle à l'intensité efficace du courant :

$$U_{eff} = ZI_{eff}$$

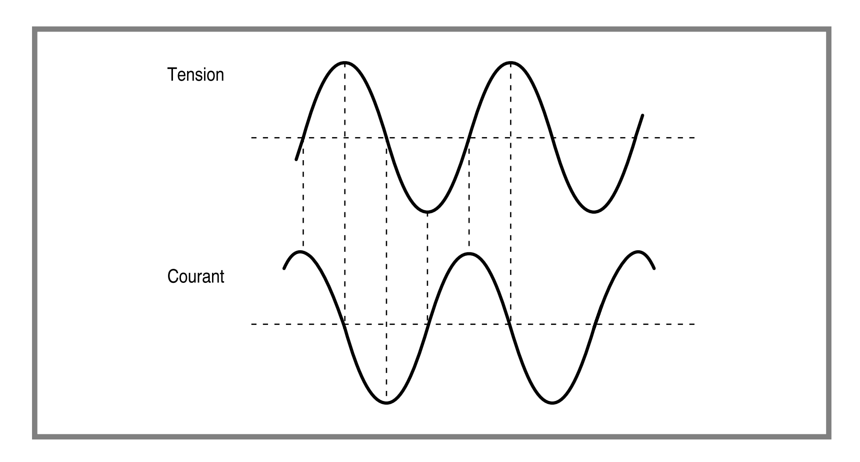


Figure 2.13 – Tension et courant en quadrature.

Le coefficient Z est l'impédance du condensateur. Si l'on augmente la fréquence, on constate que l'impédance diminue. On a en effet :

$$Z = \frac{1}{2\pi fC}$$

La notion d'impédance pour un condensateur est voisine de la notion de résistance puisque la relation entre U et I a même forme que la loi d'Ohm. Toutefois, des différences importantes sont à noter. Tout d'abord, l'impédance ne se définit qu'en régime sinusoïdal permanent alors que la résistance est une grandeur indépendante des formes du courant et de la tension. En deuxième lieu, l'impédance d'un circuit ne décrit pas complètement son fonctionnement en sinusoïdal : il faut lui associer la connaissance du déphasage entre courant et tension. Pour terminer, l'impédance varie avec la fréquence des signaux, alors

que la résistance est une constante. Cependant, en tenant compte des diverses restrictions qui viennent d'être exposées, on peut raisonner sur les impédances un peu comme sur les résistances. Les variations de l'impédance des condensateurs sont exploitées pour la réalisation des filtres de fréquence.

2.2 Caractéristiques technologiques

Valeurs et précision

De la même façon que pour les résistances, les capacités des condensateurs disponibles appartiennent aux séries normalisées indiquées dans le *tableau 1.2*. Toutefois, le problème est un peu moins simple pour les condensateurs. Du fait des technologies différentes employées, on ne dispose pas d'éléments de précision identique dans toute la gamme des valeurs possibles. Pour les capacités les plus courantes entre 1 nF et 1 µF, on trouve souvent des progressions E12, avec des précisions de 10 % ou 5 %. Pour les valeurs plus faibles (1 pF à 1 nF) et plus élevées (1 µF à 47 mF environ), on se contente en général de séries E6 ou même E3 car les précisions sont médiocres : ± 20% et même – 20 %, + 50 % pour les fortes valeurs.

Tension maximale

Si une tension trop importante est appliquée aux bornes du condensateur, le diélectrique se perce et le composant est détruit : c'est le claquage du condensateur. Il existe donc une tension limite précisée par les constructeurs pour chaque modèle. Suivant la technologie et la capacité du condensateur, les tensions maximales sont assez variables : quelques volts à plusieurs milliers de volts.

Marquage

Beaucoup de condensateurs sont marqués en clair : la capacité et la tension limite sont indiquées en chiffres sur le corps du composant, avec ou sans indication d'unité. Par exemple, un condensateur poly-

carbonate marqué 47n 250 a une capacité de 47 nF et une tension maximale de 250 V. Un condensateur tantale marqué 10/25 a une capacité de 10 μF et une tension de 25 V. Certains éléments peuvent être marqués par le code des couleurs. Plusieurs dispositions se rencontrent pour les différentes bandes colorées (*figure 2.14*).

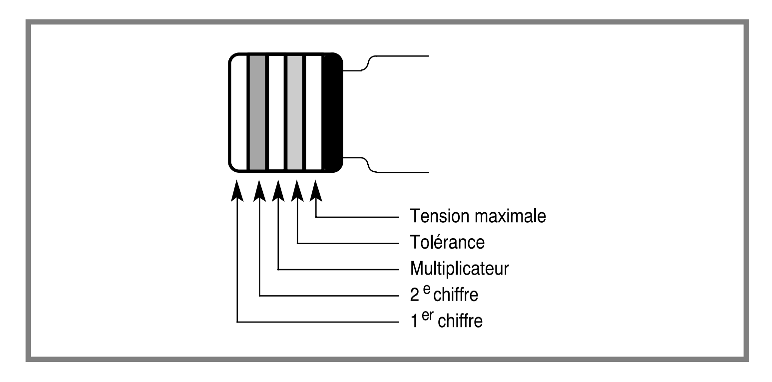


Figure 2.14 – Marquage des condensateurs au polyester métallisé.

Le *tableau 2.3* précise la signification des couleurs.

Technologies

La grande variété des matériaux diélectriques employés conduit à de nombreux types de condensateurs de propriétés diverses. L'usage de telle ou telle technologie dépend de la gamme de capacités et des performances attendues. En particulier, les différents types de condensateurs ont un domaine de fréquence qui leur est propre. On ne fera ici que citer les principales caractéristiques des familles technologiques les plus répandues.

Condensateurs à film plastique

Les condensateurs les plus utilisés sont à film plastique. De nombreuses variétés de plastiques peuvent être employées : polyester,

polystyrène, polycarbonate, polypropylène… Les condensateurs à film plastique ont de bonnes performances. Les pertes sont réduites. La tension maximale est en général de plusieurs centaines de volts (parfois quelques dizaines de volts, plus rarement quelques milliers de volts). Les valeurs s'échelonnent entre 1 nF et quelques microfarads. Les tolérances sont habituellement de 5 % ou 10 %, plus rarement de 20 %. On rencontre aussi des séries de précision à 1 % ou 2 %. Dans un laboratoire courant, on trouve au moins un assortiment complet de condensateurs plastique en progression E6 ou E12. Dans les applications, on essaie en général de choisir les valeurs de capacités dans la gamme des condensateurs plastique, lorsque cela est possible. Toutefois, certains domaines exigeront d'autres ordres de grandeur de capacités et on fera alors appel à des technologies différentes.

Tableau 2.3 – Signification du code des couleurs pour le marquage des condensateurs.

Couleur	1er anneau 1er chiffre	2e anneau 2e chiffre	3e anneau Multiplicateur	4e anneau Précision	5e anneau Tension maximale
Noir		0		20 %	
Marron	1	1	× 10 pF		
Rouge	2	2	× 100 pF		250 V
Orange	3	3	× 1 nF		
Jaune	4	4	× 10 nF		400 V
Vert	5	5	× 100 nF		
Bleu	6	6	× 1 µF		
Violet	7	7	× 10 µF		
Gris	8	8			
Blanc	9	9		10 %	

Condensateurs céramique

La deuxième grande catégorie est formée par les condensateurs céramique. De nombreuses variantes existent, mais on peut cependant donner des caractéristiques communes à tous ces condensateurs. Tout d'abord, les condensateurs céramique sont surtout destinés à une utilisation en hautes fréquences. Les pertes peuvent être importantes en particulier aux fréquences basses. Les valeurs s'échelonnent entre 1 pF et 100 nF environ. La précision est en général médiocre : 20 % est une valeur courante. Il existe cependant des séries plus précises. Les condensateurs céramique seront surtout utilisés dans des applications où la valeur exacte de la capacité n'a pas d'importance.

Condensateurs électrolytiques

Pour les fortes valeurs de capacité, on fait appel aux condensateurs électrolytiques à l'aluminium, plus simplement appelés condensateurs chimiques. On trouve ces composants pour des capacités comprises entre 1 µF et quelques millifarads, voire parfois quelques dizaines de millifarads. Les condensateurs chimiques ne peuvent être utilisés qu'aux basses fréquences. Ils sont polarisés : un mauvais sens de branchement peut amener l'explosion du composant. Les tensions de service sont assez faibles : quelques dizaines de volts. On trouve toutefois des tensions plus élevées pour des applications particulières. Les tolérances sont médiocres : souvent – 20 %, + 50 %. Ces condensateurs sont encombrants (particulièrement pour les valeurs élevées de capacité) et leur prix croît rapidement pour les fortes capacités et les tensions de service importantes. On n'utilisera donc ces éléments que si cela est absolument nécessaire et pour des applications où la valeur exacte de la capacité n'est pas importante.

Condensateurs au tantale

On trouve également des capacités élevées (0,1 µF à quelques centaines de microfarads) pour les condensateurs au tantale. Ces derniers sont moins encombrants et plus fiables que les chimiques à l'aluminium. Ils sont polarisés et leurs tensions de service sont faibles (quelques volts ou quelques dizaines de volts). Leur coût est plus élevé que pour les condensateurs à l'aluminium.

On vient de constater qu'il faut prêter un minimum d'attention à la technologie des condensateurs pour les utiliser correctement. Pour résumer, la *figure 2.15* rappelle les ordres de grandeur des capacités que l'on trouve couramment pour chaque type et la *figure 2.16* indique les domaines de fréquence utilisables. Il s'agit là de caractéristiques approchées pour des fabrications courantes et l'on peut évidemment rencontrer des modèles particuliers qui sortent des limites données.

Condensateurs variables

On ne dispose pas en général de condensateurs variables, sauf dans quelques cas particuliers. On a d'abord les condensateurs à lame d'air qui sont formés d'une armature fixe et d'une armature mobile montée sur un axe. En faisant tourner l'armature, on fait varier la surface des plaques en regard, ce qui se traduit par une modification de la capacité. Il n'y a pas de diélectrique, ce rôle est joué par l'air présent entre les armatures. Les capacités sont donc très faibles. Ce genre de matériel n'est utilisé que pour l'accord des circuits oscillants des récepteurs radio. On trouve aussi des ajustables à la céramique ou au plastique. Ces petits condensateurs ont de faibles capacités (quelques picofarads ou quelques dizaines de picofarads). Le réglage se fait à l'aide d'une vis.

2.3 Domaines d'utilisation

Les condensateurs ont de multiples usages. Selon les cas, on exploite le fait qu'ils accumulent une certaine énergie, dans d'autres cas, c'est la variation de leur impédance avec la fréquence qui est utile. L'exemple le plus frappant de l'accumulation d'énergie est le flash d'un appareil photo. Les piles chargent un condensateur pendant un certain temps, puis le condensateur se décharge brusquement dans le tube du flash. La quantité d'énergie fournie pendant cette brève durée permet l'obtention de l'éclair.

Dans les alimentations continues à partir du secteur, on utilise un gros condensateur pour le filtrage (*figure 2.17*).

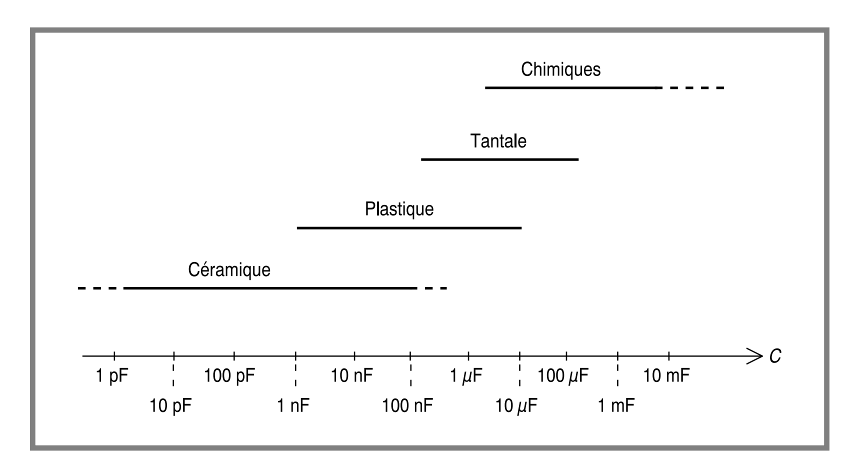


Figure 2.15 – Ordre de grandeur des capacités disponibles pour les différents types de condensateurs.

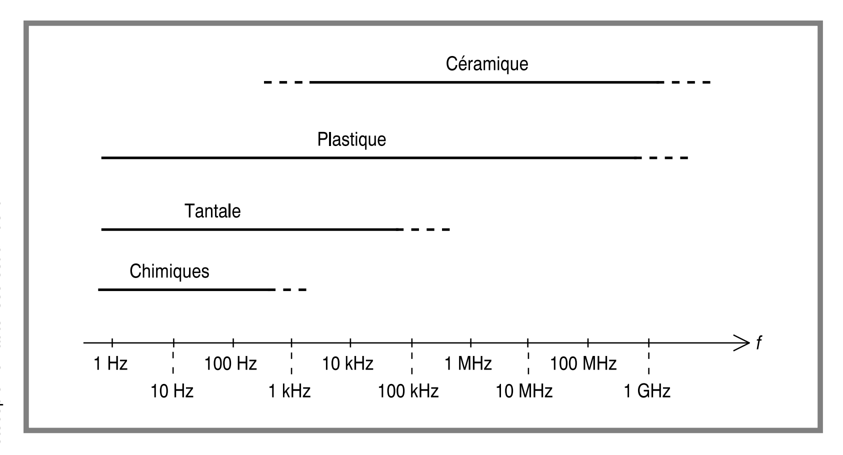


Figure 2.16 – Domaines de fréquence utilisables pour les différents types de condensateurs.

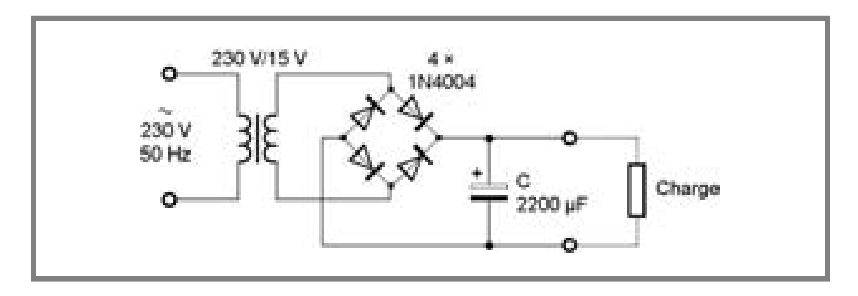


Figure 2.17 – Alimentation continue avec condensateur de filtrage.

Le pont de diodes redresse le signal alternatif obtenu au secondaire du transformateur. En l'absence de condensateur, on observe la tension éloignée du continu (*figure 2.18*).

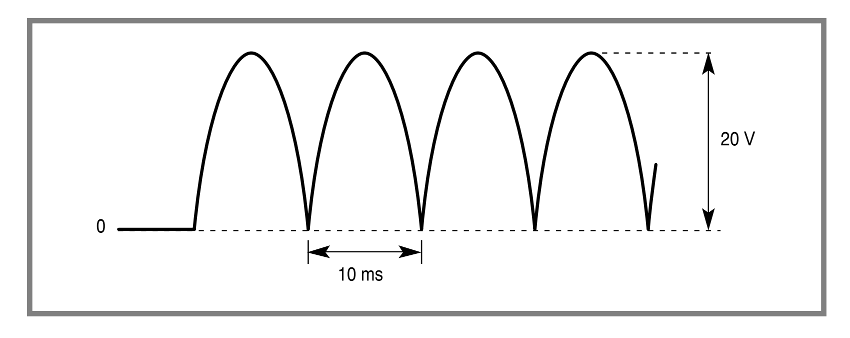


Figure 2.18 – Allure de la tension redressée (sans filtrage).

Si l'on branche le condensateur, mais que l'alimentation ne débite aucun courant, le condensateur se charge lors de la première montée puis garde sa charge (*figure 2.19*).
Lorsque l'alimentation débite, le condensateur se décharge légèrement puis se recharge périodiquement (*figure 2.20*).
Si la capacité est assez élevée, la tension est sensiblement continue. On utilise habituellement de gros condensateurs chimiques (centai-

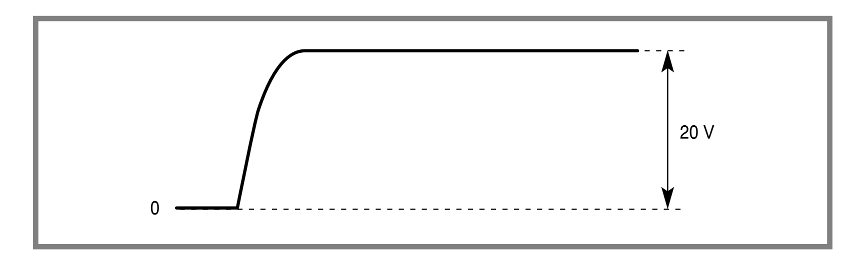


Figure 2.19 – Tension redressée et filtrée pour une alimentation à vide.

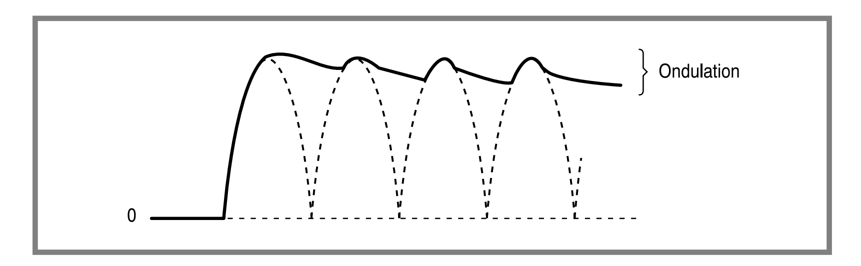


Figure 2.20 – Tension de sortie de l'alimentation en présence d'un courant débité.

nes ou milliers de microfarads). Il n'y a ici pas de problème puisque la fréquence est basse (100 Hz) car il y a deux motifs identiques dans une période du secteur 50 Hz, et que la valeur exacte de la capacité n'est pas déterminante ; il faut simplement un minimum, que l'on assurera avec une certaine marge de sécurité.

Dans le même ordre d'idées, on trouve les condensateurs de découplage connectés sur les lignes d'alimentation d'un montage (*figure 2.21*).

La tension d'alimentation est normalement continue et le condensateur se charge lors de la mise sous tension du montage et conserve cette charge. En réalité, la tension continue d'alimentation n'est pas rigoureusement constante à cause des parasites et des chutes de

tension créées par les courants consommés par les circuits. En branchant un condensateur entre la ligne d'alimentation et la masse, on élimine ces variations de tension qui pourraient perturber le fonctionnement du montage. En effet, le condensateur, grâce à son énergie accumulée, apporte une certaine inertie à la tension. En cas de brève variation de l'alimentation, le condensateur n'a pas le temps de modifier sa charge et maintient la tension constante. Pour remplir correctement son rôle, le condensateur doit être connecté au plus près du circuit afin qu'il ne puisse pas y avoir de chute de tension entre le découplage et le montage lui-même.

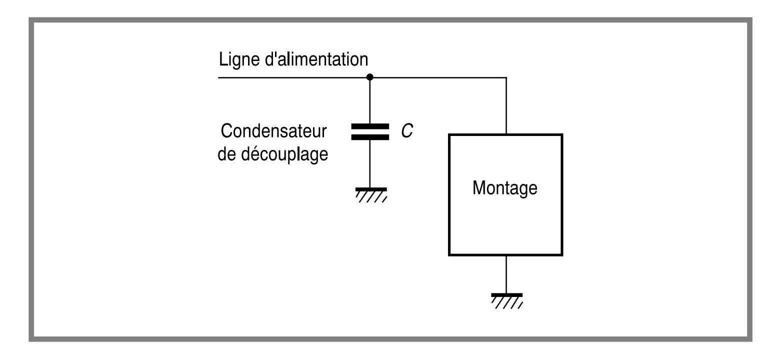


Figure 2.21 – Condensateur de découplage sur une ligne d'alimentation.

Suivant la nature des signaux à éliminer, on utilisera la technologie appropriée pour le condensateur. Les variations étant souvent rapides (parasites de commutation par exemple), on fait souvent appel à des condensateurs céramique. Si des variations lentes sont à craindre (résidu d'ondulation secteur par exemple), il faut disposer d'une capacité plus élevée et on emploie alors des éléments chimiques. Si l'on veut éliminer des variations lentes ou rapides, on utilise une association formée par un condensateur céramique et un chimique comme on l'a déjà indiqué. Dans les montages à circuits intégrés, il faut réaliser suivant les cas un découplage par circuit ou par groupe de circuits. La valeur des capacités à employer est indiquée dans les spécifications des composants.

La variation de l'impédance d'un condensateur avec la fréquence est exploitée dans les filtres. Ces circuits permettent d'éliminer certaines composantes d'un signal et d'en conserver d'autres (celles qui appartiennent à la bande passante du filtre). Le condensateur laisse facilement passer les composantes de hautes fréquences (son impédance est alors faible) mais s'oppose au passage des composantes de basses fréquences (son impédance est alors élevée). Ainsi, suivant le branchement du ou des condensateurs, on peut favoriser les fréquences basses, moyennes ou hautes et réaliser un filtre passe-bas, passe-bande ou passe-haut. Par exemple, on sépare les aigus (fréquences élevées) et les graves (fréquences basses) à la sortie d'un amplificateur audio (*figure 2.22*). Les bobines viennent renforcer l'effet des condensateurs.

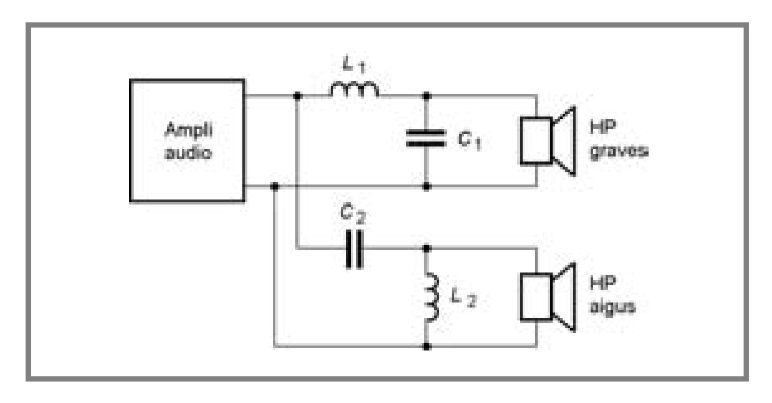


Figure 2.22 – Séparation des graves et des aigus par un filtre passe-haut et un filtre passe-bas.

Un autre emploi très fréquent pour le condensateur est le circuit de liaison. Il faut très souvent séparer les composantes continues qui constituent la polarisation et les composantes alternatives qui forment le signal utile. Au chapitre précédent, on a donné le schéma d'un amplificateur à transistor. On a vu que la tension de polarisation de base était fixée par les résistances R_1 et R_2. Pour que le générateur

qui fournit le signal à amplifier ne modifie pas le point de polarisation, on a placé un condensateur de liaison C_1 à l'entrée. Comme le courant continu ne peut pas traverser un condensateur, il n'y a effectivement aucune influence. C_2 joue le même rôle à la sortie. Toutefois, pour que la liaison soit correcte, il faut que le condensateur laisse passer le signal utile. Pour que l'on puisse considérer que le résultat est correct, il suffit que l'impédance du condensateur soit faible devant la résistance d'entrée de l'amplificateur, c'est-à-dire la résistance qui est vue par le signal variable entre les bornes d'entrée après le condensateur. En effet, le circuit se ramène à un diviseur d'impédances (*figure 2.23*).

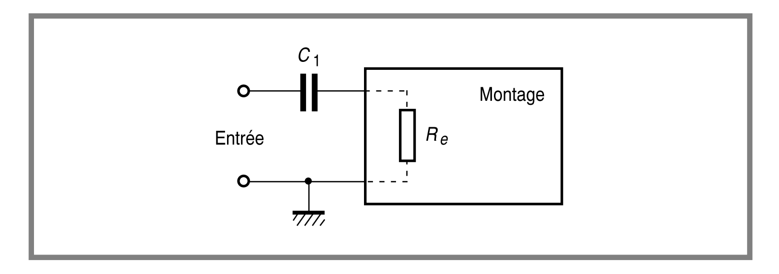


Figure 2.23 – Condensateur de liaison à l'entrée d'un circuit.

La chute de tension dans C_1 est négligeable si :

$$\frac{1}{2\pi f C_1} << R_e$$

On en déduit une valeur minimale pour C_1. On choisit souvent un coefficient de 10 en prenant :

$$\frac{1}{2\pi f C_{1min}} = \frac{R_e}{10}$$

et donc :

$$C_{1min} = \frac{10}{2\pi f R_e}$$

Si le signal comporte des composantes de diverses fréquences, il faut vérifier la relation pour toutes les fréquences. Pour cela, il suffit de la vérifier pour la fréquence la plus faible.

Par exemple un amplificateur fonctionne en audiofréquences (20 Hz à 20 kHz environ). Sa résistance d'entrée est 10 kΩ (on la calcule dans l'étude de l'amplificateur). La capacité de liaison d'entrée doit bien jouer son rôle, même à 20 Hz ; sa valeur minimale est :

$$C_{1min} = \frac{10}{2\pi \times 20 \times 10\ 000} = 7{,}96\ \mu\text{F}$$

On choisit ensuite une valeur normalisée supérieure. S'agissant d'une capacité élevée, on ne dispose en général que d'une progression E6 ou E3. On prend donc $C = 10\ \mu$F.

On utilise aussi des condensateurs pour créer des impulsions à partir d'une tension carrée : c'est le montage dérivateur (*figure 2.24*).

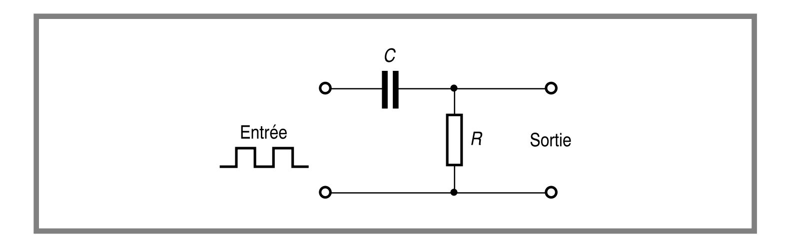


Figure 2.24 – Montage dérivateur permettant de générer des impulsions à partir d'un signal carré.

Lors d'un front montant appliqué à l'entrée, le condensateur transmet la discontinuité à la sortie car il ne peut pas se charger instantanément. Ensuite, la résistance étant soumise à une différence de potentiel, il circule un courant qui charge le condensateur. Si la constante de temps *RC* est faible, la phase de charge est brève et on peut considérer que le signal apparu en sortie est une impulsion. Le fonctionnement est similaire aux fronts descendants (*figure 2.25*).

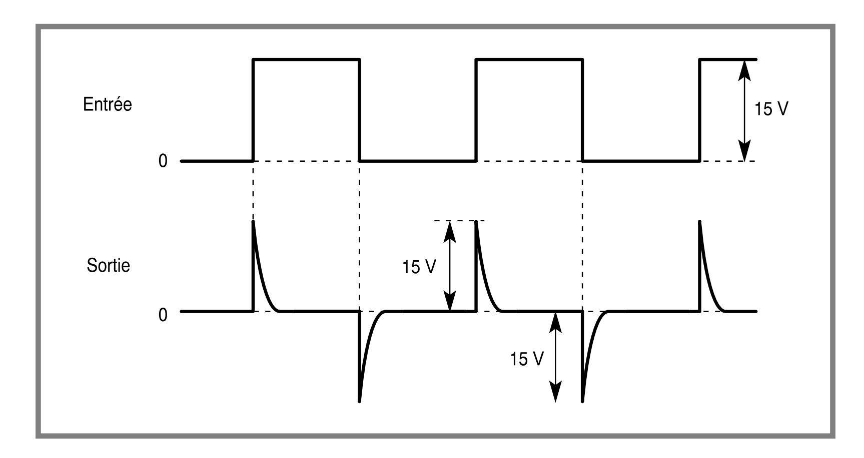


Figure 2.25 – Impulsions en sortie du dérivateur.

Les condensateurs permettent aussi de faire évoluer des tensions ou des courants pendant une durée déterminée et de réaliser ainsi des générateurs de signaux ou des temporisateurs. On emploie pour cela un circuit de commutation (en général intégré), un condensateur et une ou plusieurs résistances. Un montage très classique est le générateur de signaux carrés (ou circuit astable) réalisé avec un temporisateur intégré 555 (*figure 2.26*).

Le condensateur se charge et se décharge périodiquement. Les charges se font à travers R_A et R_B tandis que les décharges se font à travers R_B et le circuit intégré. Ce dernier effectue des commutations lorsque la tension aux bornes du condensateur atteint $V_{CC}/3$ ou $2V_{CC}/3$ (*figure 2.27*).

La fréquence des signaux correspond à la formule :

$$f = \frac{1{,}44}{(R_A + 2R_B)C}$$

La valeur obtenue est fixée par les résistances R_A et R_B et la capacité C, en fait par l'intermédiaire des constantes de temps de la charge $(R_A + R_B)C$ et de la décharge R_BC. On voit ici l'importance de la

Figure 2.26 – Générateur de signaux carrés à circuit intégré 555 (les numéros correspondent au boîtier DIL 8 broches).

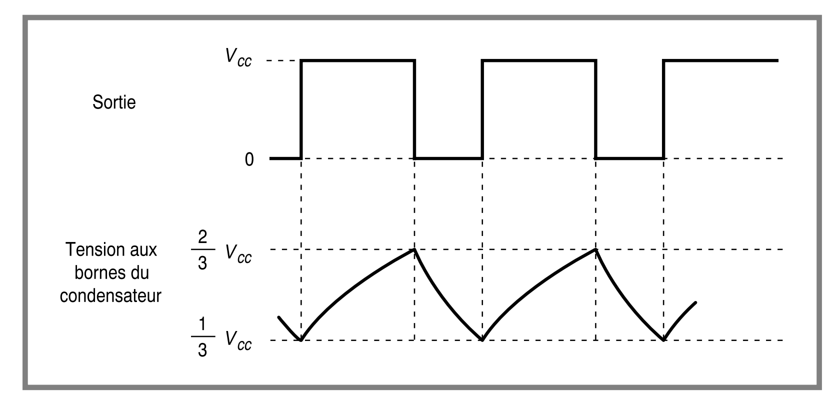


Figure 2.27 – Évolution des tensions dans le générateur de signaux carrés.

tolérance sur les composants. Un condensateur de bonne précision est nécessaire. On emploie donc un composant au plastique, ou parfois un céramique de bonne qualité. Cette remarque est valable pour tous les montages dont une caractéristique de sortie (durée, fréquence…) dépend de la valeur exacte d'une capacité. Avec les éléments du schéma, on obtient une fréquence de 2,19 kHz.

Il existe plusieurs petits logiciels permettant de calculer la fréquence et le rapport cyclique du signal carré obtenu en sortie d'un astable à 555 à partir des données des résistances et de la capacité. D'autres logiciels, plus intéressants pour le concepteur, calculent les valeurs à donner aux composants pour obtenir une fréquence et un rapport cyclique fixés. On trouvera facilement ces programmes gratuits sur Internet à partir de n'importe quel moteur de recherche.

CHAPITRE 3

BOBINES ET TRANSFORMATEURS

Les composants inductifs sont souvent mal connus et peu appréciés par les électroniciens. En effet, en basse fréquence, les bobinages sont lourds et encombrants et on ne les utilise que lorsque c'est vraiment nécessaire. Par contre, en haute fréquence, les bobines sont de petite taille et leur emploi est plus intéressant.

3.1 Principe et propriétés

Inductance

Une bobine est formée d'un fil enroulé soit dans l'air, soit sur un noyau magnétique (*figure 3.1*).

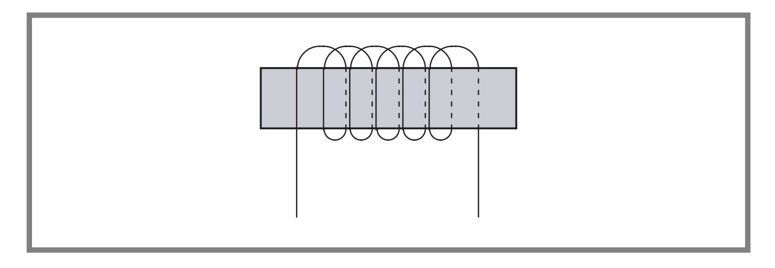


Figure 3.1 – Bobine enroulée sur un noyau ferromagnétique.

Un conducteur parcouru par un courant crée un champ magnétique (comme un aimant). La présence d'un noyau ayant des propriétés ferromagnétiques augmente considérablement le champ magnétique obtenu. Si une bobine de N spires de section S est soumise à un champ magnétique B, on appelle flux la quantité :

$$\Phi = NBS$$

Le flux Φ s'exprime en webers (symbole Wb). Si le champ magnétique a été créé par l'enroulement lui-même, on parle de flux propre. Tant que le courant I n'est pas trop élevé, le flux Φ est proportionnel au courant qui l'a engendré :

$$\Phi = LI$$

Le coefficient L est l'inductance (ou auto-inductance) de la bobine. La traduction anglaise est *self-inductance*, ce qui explique que l'on parle souvent dans le langage courant de *self* pour désigner une bobine. L'unité d'inductance est le henry (symbole H), du nom du physicien américain J. Henry connu pour ses études sur le phénomène d'auto-induction. On utilise les sous-multiples : le millihenry (mH) et le microhenry (µH).

Énergie emmagasinée

Une bobine emmagasine de l'énergie sous forme électromagnétique lorsqu'elle est parcourue par un courant. On utilise dans certains cas les échanges d'énergie entre bobines et condensateurs (circuit oscillant LC). Une bobine idéale n'aurait aucune perte d'énergie, mais en réalité, le conducteur employé pour l'enroulement a aussi une certaine résistance qui entraîne des pertes par effet Joule. L'effet de cette résistance est négligeable devant celui de l'inductance dans certaines applications, mais il modifie un peu les choses dans de nombreux cas. Le fait que l'énergie stockée corresponde à une circulation de courant donne à la bobine un effet d'inertie pour le courant. En particulier, ce courant ne peut pas être discontinu et la présence d'une bobine en série dans une connexion ralentit les variations de l'intensité. On constate un certain parallèle entre condensateur et

bobine : le premier a un effet d'inertie sur la tension tandis que la deuxième a un effet d'inertie sur le courant.

Non-linéarité

Si la présence d'un noyau ferromagnétique a l'avantage de donner une inductance beaucoup plus élevée, elle a aussi l'inconvénient d'amener une non-linéarité dans le fonctionnement de la bobine. Quand le courant est faible, le flux est proportionnel à l'intensité, mais, à partir d'un certain seuil, le flux ne croît plus aussi vite puis se stabilise pratiquement : c'est le phénomène de saturation. Si un élément est saturé, on ne peut plus employer la notion d'inductance. Une caractéristique importante d'un bobinage est donc le courant maximal possible sans atteindre la saturation. En dehors des pertes par effet Joule déjà citées, les bobines à noyau ont également des pertes ferromagnétiques. Il s'agit d'une puissance perdue à cause de deux phénomènes : l'hystérésis, qui est un comportement différent selon que le courant est croissant ou décroissant, et les courants de Foucault, qui sont des courants induits dans les masses métalliques. Pour les applications, il est important de savoir que ces pertes ferromagnétiques augmentent avec la fréquence et dépendent de la nature du matériau qui forme le noyau.

Symboles

Une bobine peut être représentée par son symbole normalisé (*figure 3.2*), mais on rencontre aussi d'autres symboles (*figure 3.3*).

Associations

On peut associer les bobines en série ou en parallèle, mais ces groupements sont très peu utilisés. Les lois d'association pour les inductances sont les mêmes que celles qui ont été citées pour les résistances.

Transformateur

Un transformateur est constitué de deux enroulements placés sur le même noyau magnétique fermé (*figure 3.4*).

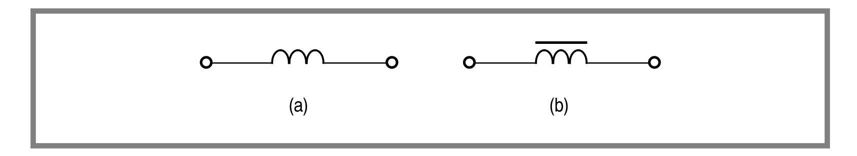


Figure 3.2 – Symboles normalisés pour une bobine (la représentation (b) est employée s'il y a un noyau ferromagnétique).

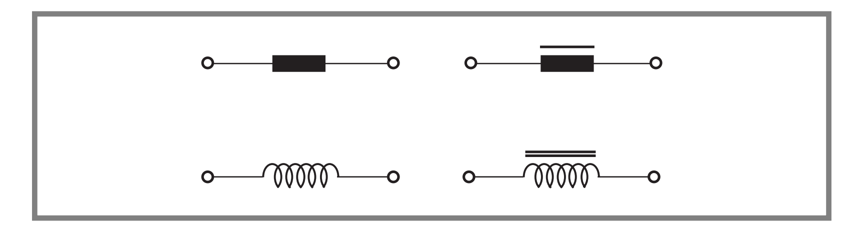


Figure 3.3 – Divers symboles rencontrés pour la représentation des bobines.

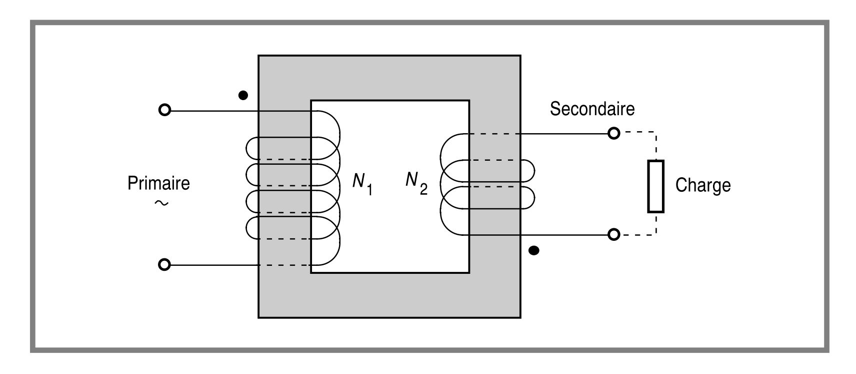


Figure 3.4 – Principe d'un transformateur. Les points distinguent les extrémités des enroulements qui ont même polarité instantanée sur les symboles de la figure 3.5 (cela dépend du sens de bobinage).

Il s'agit ici d'un schéma de principe, les réalisations sont un peu différentes. Quand on applique une tension variable sur l'un des enroulements (appelé primaire), un flux est créé. Du fait du noyau ferromagnétique, les lignes de flux sont obligées de se refermer (dans leur presque totalité) en passant dans le deuxième enroulement (appelé secondaire). Ce flux variable crée une force électromotrice induite dans ce bobinage, c'est-à-dire qu'il apparaît une tension entre ses bornes. Le rapport de la tension obtenue au secondaire et de la tension appliquée au primaire est constant, égal au rapport des nombres de spires des enroulements :

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = k$$

Le nombre k est le rapport de transformation de l'appareil.

Lorsque l'on ferme le circuit du secondaire sur une charge, il apparaît un courant induit. Ce dernier crée également un flux qui se superpose à celui du primaire pour donner le flux résultant. La tension présente entre les bornes du secondaire chute un peu par rapport à celle que l'on avait à vide, mais en reste voisine. Le courant I_1 appelé par le primaire du transformateur dépend du courant I_2 dans la charge. On a, de manière approchée :

$$I_1 = kI_2$$

Cette relation est bien vérifiée pour les gros transformateurs, mais elle est plus approximative pour les petites unités. Son application suffit toutefois pour des calculs approchés comme la détermination du calibre du fusible à brancher sur le primaire.

Il est important de noter qu'un transformateur ne fonctionne qu'avec des signaux variables. Il n'a pas d'équivalent en continu. Les transformateurs peuvent être abaisseurs ($k < 1$) ou élévateurs ($k > 1$). Un cas particulier est le transformateur d'isolement ($k = 1$). Il ne modifie pas la tension, mais permet d'avoir un isolement électrique entre les circuits branchés au primaire et au secondaire. Les pertes d'un transformateur sont les mêmes que celles d'une bobine : effet Joule dans les enroulements, hystérésis et courants de Foucault.

Les transformateurs peuvent être représentés par leur symbole normalisé (*figure 3.5*) ou par d'autres symboles (*figure 3.6*).

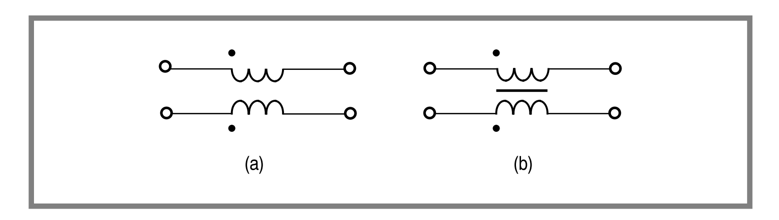


Figure 3.5 – Symboles normalisés pour un transformateur (la variante (b) indique la présence d'un noyau ferromagnétique).

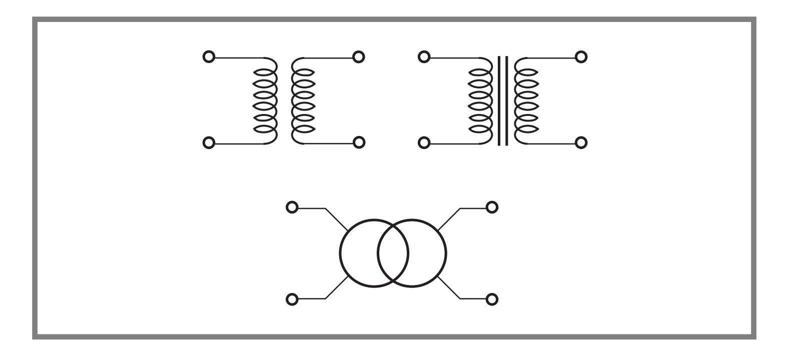


Figure 3.6 – Divers symboles rencontrés pour la représentation des transformateurs.

Établissement du courant dans une bobine

Si l'on applique une tension constante à une bobine, le courant augmente linéairement :

$$I = \frac{U}{L} t$$

Cette loi de variation n'est toutefois valable que tant que la bobine n'est pas saturée. Les variations du courant I en fonction du temps t sont représentées par un segment de droite (*figure 3.7*).

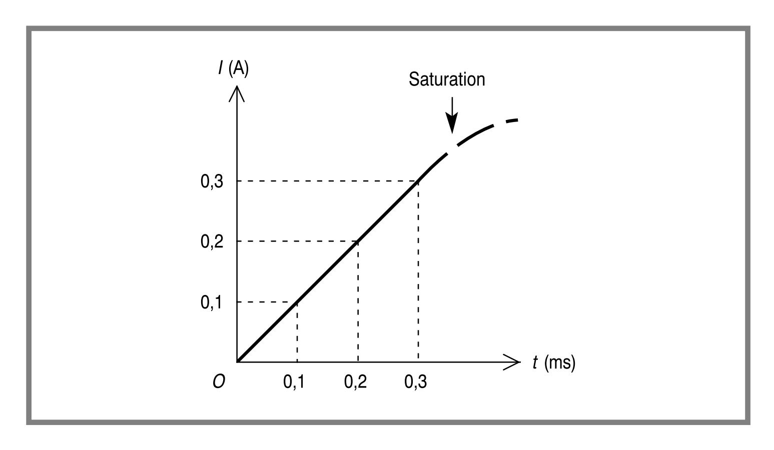


Figure 3.7 – Établissement du courant dans une bobine soumise à une tension constante.

On a choisi pour le tracé une inductance de 10 mH soumise à une tension de 10 V.

Si le courant s'établit à travers une résistance R (*figure 3.8*), la courbe devient une exponentielle (*figure 3.9*) identique à celle qui représente la tension lors de la charge d'un condensateur (voir chapitre 2).

La constante de temps est dans ce cas :

$$\tau = \frac{L}{R}$$

Au bout de quelques constantes de temps, le courant est stabilisé à sa valeur de repos :

$$I_0 = \frac{E}{R}$$

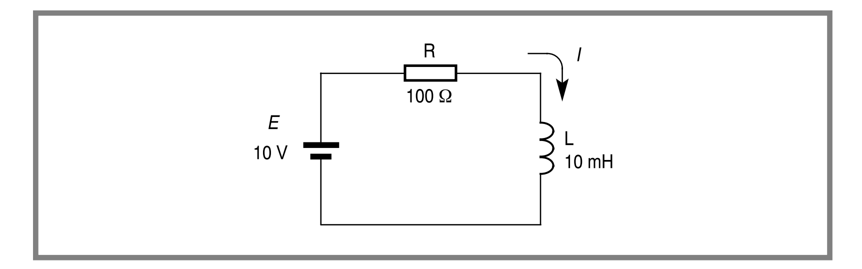


Figure 3.8 – Établissement du courant dans une bobine à travers une résistance.

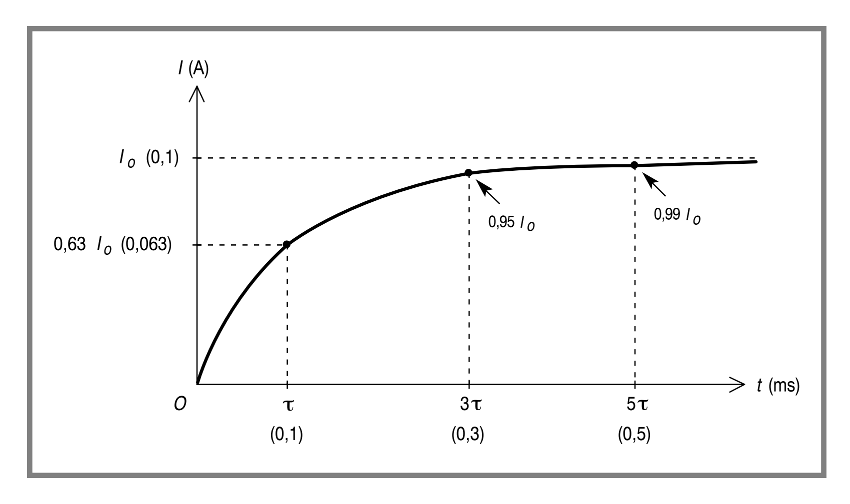


Figure 3.9 – Évolution du courant dans la bobine.

Les phénomènes sont similaires lors de l'extinction du courant (*figures 3.10 et 3.11*).

Il ne faut pas ouvrir le circuit contenant la bobine : le courant ne pouvant s'annuler brusquement à cause de l'énergie emmagasinée dans la bobine, il se produirait un arc électrique entre les contacts ouverts.

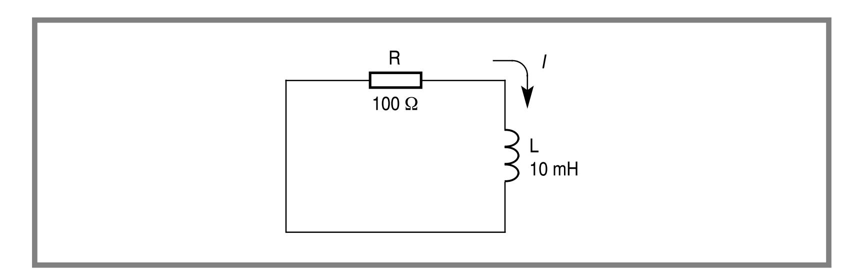


Figure 3.10 – Circuit pour l'extinction du courant dans la bobine.

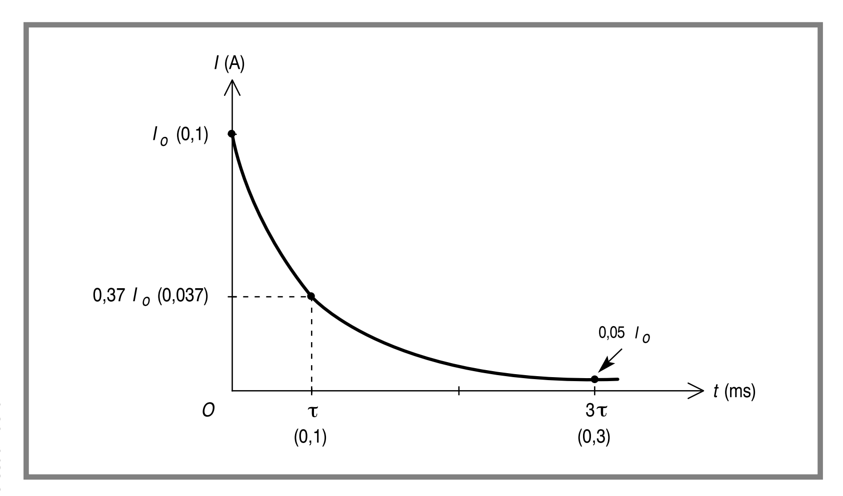


Figure 3.11 – Évolution du courant lors de son extinction.

Bobine en alternatif

Pour une bobine idéale (résistance négligeable), la tension et le courant sont en quadrature, mais, contrairement à ce qui se passe pour un condensateur, c'est le courant qui est en retard sur la tension (*figure 3.12*).

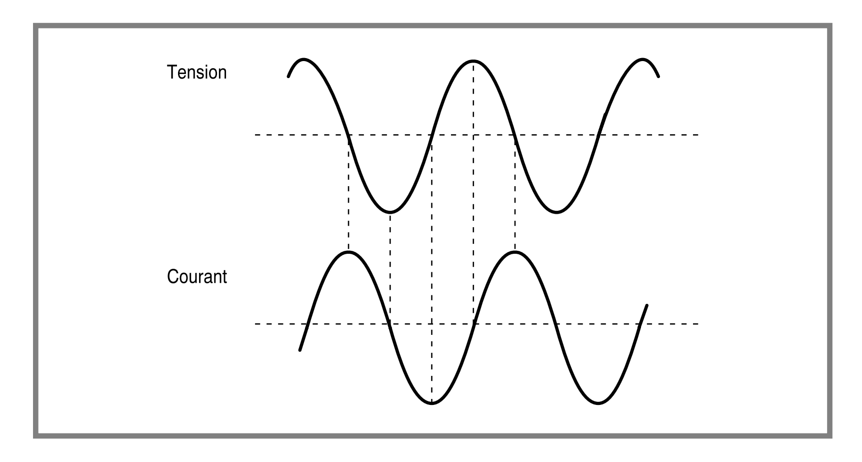


Figure 3.12 – Tension et courant en quadrature.

L'impédance augmente avec la fréquence *f* et s'exprime par la formule :

$$Z = 2\pi f L$$

Cette variation de l'impédance, opposée à celle qui est observée pour un condensateur, est également utilisée dans certains filtres.

3.2 Caractéristiques technologiques

Bobines à noyau de fer

On trouve principalement dans cette catégorie les transformateurs d'alimentation fonctionnant sur le secteur 50 Hz. Le noyau magnétique est indispensable. Il est réalisé en tôles de fer additionné de silicium. Le noyau est feuilleté pour limiter les courants de Foucault et diminuer ainsi les pertes correspondantes. On emploie en général une découpe des tôles en EI (*figure 3.13*).

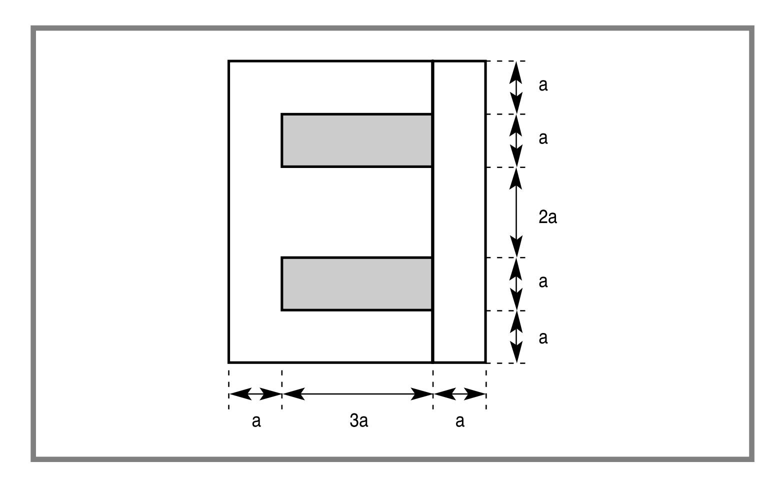


Figure 3.13 – Découpage des tôles en EI.

Les diverses dimensions sont multiples d'une longueur élémentaire *a* comme le montre la *figure 3.13*. Les bobinages sont placés sur la partie centrale du noyau. Le primaire et le secondaire sont superposés, contrairement à ce qui a été représenté sur le schéma de principe. Cette disposition permet de limiter les fuites de flux entre les enroulements. Le transformateur est souvent maintenu par un étrier et peut être monté sur un circuit imprimé. Les bornes des bobinages sont sorties sur des cosses. De nombreux transformateurs ont un secondaire à point milieu ou même à prises multiples. Cela permet de disposer de plusieurs valeurs de tensions. Dans les alimentations, on utilise suivant les cas le secondaire complet ou les deux demi-secondaires (voir plus loin les applications). Les principales caractéristiques d'un transformateur d'alimentation sont ses tensions nominales (au primaire et au secondaire) et sa puissance apparente. La puissance apparente du transformateur permet de définir le courant maximal que l'on peut demander au secondaire ; elle s'exprime par le produit de la tension du secondaire par le courant débité (valeurs efficaces) :

$$S = U_2 I_2$$

L'unité de puissance apparente est le voltampère (symbole VA).

On peut bobiner soi-même les transformateurs, mais pour les modèles courants, il est plus facile de les acheter déjà réalisés. Les modèles que l'on rencontre habituellement sont prévus pour une tension primaire de 220 V et possèdent un ou deux secondaires dont les tensions nominales sont souvent : 6 V, 9 V, 12 V, 15 V, 18 V et 24 V. Les puissances apparentes disponibles habituellement vont de 3 à 100 VA. Le transformateur est d'autant plus lourd (et encombrant et cher) que sa puissance apparente est élevée.

On trouve aussi parfois des transformateurs toriques (*figure 3.14*) qui ont de bonnes performances et en particulier ne rayonnent pas. Leur prix est cependant plus élevé.

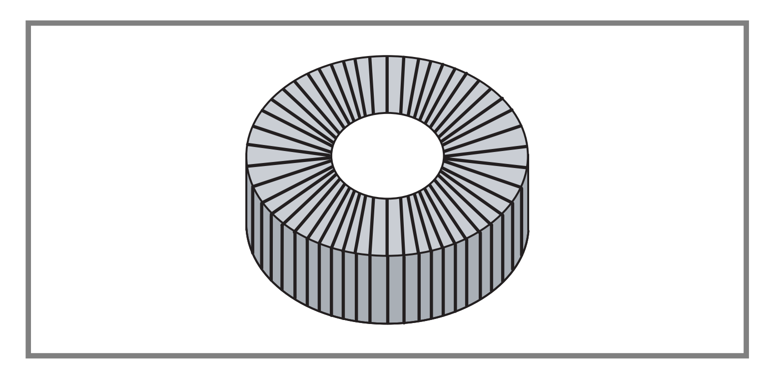


Figure 3.14 – Transformateur torique.

Les noyaux de fer ne peuvent être utilisés que pour des fréquences limitées à quelques centaines de hertz. Au-delà, les pertes ferromagnétiques deviennent trop importantes.

Bobines à noyau de ferrite

Aux fréquences moyennes ou hautes, on utilise des bobines et des transformateurs à noyau de ferrite. Dans cette catégorie de matériaux, on trouve de nombreux types différents destinés à des domaines

divers. La plage des fréquences utilisables est une caractéristique essentielle des ferrites : elle peut être située entre 1 kHz et 100 kHz pour certaines références, mais s'étend de 100 MHz à 1 GHz pour d'autres. Le deuxième paramètre important est l'inductance spécifique A_L. L'inductance L d'un bobinage est proportionnelle au carré du nombre de spires N. A_L est le coefficient de proportionnalité :

$$L = A_L N^2$$

De nombreuses présentations différentes existent pour les bobinages sur ferrites. Pour les faibles courants (fil fin), on a souvent recours à un « pot » formé de deux coupelles maintenues par un étrier. L'enroulement est bobiné sur un petit support plastique placé à l'intérieur des coupelles. Pour des courants plus élevés, on choisit des noyaux du genre EI ou des tores.

On rencontre aussi des bobines miniatures de forme et de dimensions comparables à celles d'une résistance. On dispose d'inductances pouvant aller de 0,1 µH à 10 mH. Certains modèles sont marqués en clair, d'autres suivant un code des couleurs (*figure 3.15*).

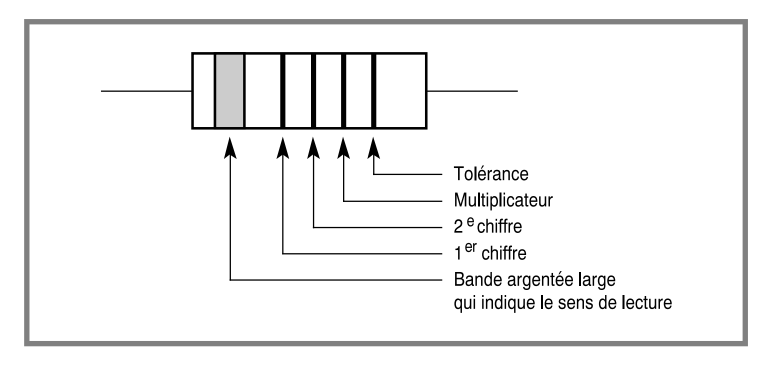


Figure 3.15 – Marquage d'une bobine miniature par le code des couleurs.

Le *tableau 3.1* donne la signification des couleurs.

Tableau 3.1 – Signification du code des couleurs pour le marquage des bobines miniatures.

Couleur	1er anneau 1er chiffre	2e anneau 2e chiffre	3e anneau multiplicateur	4e anneau tolérance
Noir		0	× 1 µH	
Marron	1	1	× 10 µH	
Rouge	2	2	× 100 µH	
Orange	3	3	× 1 mH	
Jaune	4	4		
Vert	5	5		
Bleu	6	6		
Violet	7	7		
Gris	8	8		
Blanc	9	9		
Rien				20 %
Argent				10 %
Or				5 %

Un cas particulier apparaît lorsque l'inductance est inférieure à 10 µH : il n'y a pas de bande de multiplicateur, mais la virgule décimale est indiquée par un anneau de couleur or (*figure 3.16*).
Des transformateurs particuliers sont également disponibles pour les circuits d'amorçage des thyristors : ce sont les transformateurs d'impulsions (voir plus loin les applications). Ces éléments se

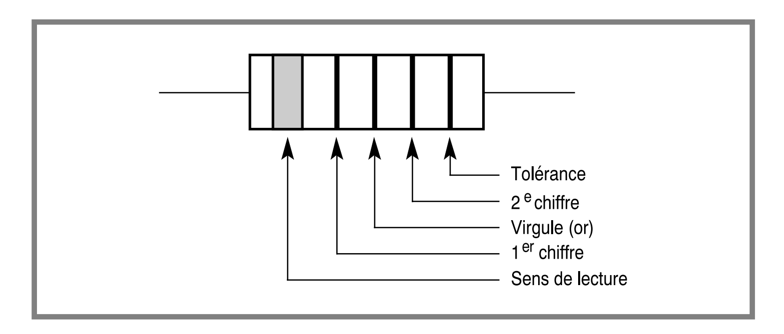


Figure 3.16 – Cas particulier des inductances inférieures à 10 µH.

présentent en général dans des boîtiers plastiques de petites dimensions dont les picots se connectent directement sur les circuits imprimés. Le rapport de transformation est souvent de 1 et de nombreux modèles possèdent plusieurs enroulements secondaires indépendants permettant un isolement sur plusieurs voies.

Bobines à air

En hautes fréquences, on emploie des bobines à air. L'inductance obtenue est faible, mais son effet est suffisant pour des signaux dans les dizaines ou centaines de mégahertz. L'absence de noyau ferromagnétique évite les problèmes de saturation. Ce type de bobine a aussi l'avantage d'être léger et peu encombrant. Il arrive que l'on utilise aussi des bobines à air pour des fréquences peu élevées afin d'éviter les problèmes de non-linéarités liés aux matériaux magnétiques, mais il faut un nombre important de spires pour obtenir les inductances nécessaires.

3.3 Domaines d'utilisation

Aux basses fréquences, on trouve peu de bobinages, leur encombrement et leur poids les rendant d'usage difficile. Le seul domaine où

l'on ne peut guère s'en passer est l'alimentation secteur classique. En effet, un isolement entre le secteur et le montage électronique est pratiquement toujours nécessaire, ne serait-ce que pour d'évidentes raisons de sécurité. Outre ce rôle, le transformateur d'alimentation sert également à abaisser la tension en vue d'obtenir des niveaux continus convenant aux circuits à alimenter : on ne dépasse pas en général quelques dizaines de volts, les valeurs 5 ou 15 V étant très fréquentes. On utilise principalement deux configurations pour les alimentations : le montage à pont de Graetz dont on a parlé au chapitre 2 et le montage « va-et-vient » (*figure 3.17*). Ce dernier ne nécessite que deux diodes pour le redressement, mais exige un transformateur à point milieu. Les performances des deux montages sont voisines, mais on préfère souvent le pont de Graetz dans les réalisations.

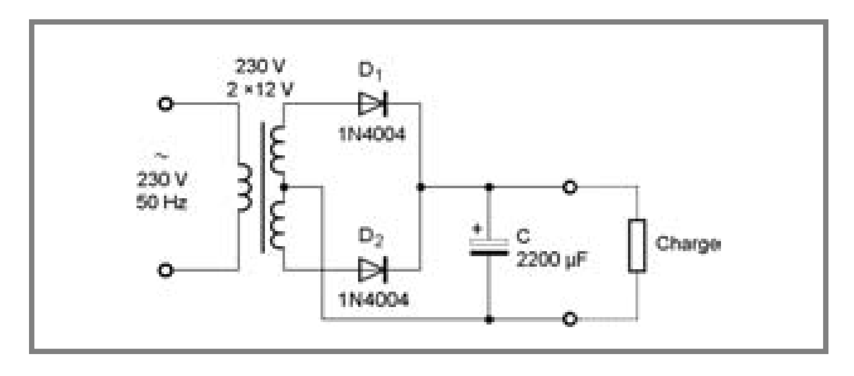


Figure 3.17 – Alimentation continue utilisant un transformateur à point milieu.

On rencontre quelques bobinages dans les filtres passifs comme ceux qui ont été décrits au chapitre précédent. Les bobines renforcent l'effet de filtrage déjà obtenu par les condensateurs : quand la fréquence augmente, l'impédance des bobines croît tandis que celle des condensateurs diminue. Aux basses fréquences, on préfère les filtres actifs qui associent des résistances, des condensateurs et des

amplificateurs opérationnels : ils permettent d'obtenir de bonnes caractéristiques sans bobinage encombrant. Cependant, ces filtres actifs exigent une alimentation continue. Quand celle-ci n'est pas disponible, il est parfois préférable de recourir aux filtres passifs. C'est en particulier le cas pour les filtres d'enceintes acoustiques. On peut faire appel à des bobines à air pour éviter les distorsions de non-linéarité. Dans le domaine des fréquences plus élevées, les bobines sont beaucoup moins encombrantes et leur usage ne pose aucun problème. On utilise donc systématiquement des cellules de filtres *LC* (bobine et condensateur) que l'on peut associer dans différentes configurations.

Un cas particulier de filtrage se rencontre dans les liaisons des appareils avec le secteur : c'est l'antiparasitage. En effet, la tension sinusoïdale du secteur est entachée d'un certain nombre de parasites dus principalement à des commutations de courants importants : interrupteurs mécaniques, thyristors, triacs, alimentations à découpage… Les circuits électroniques risquent d'être perturbés par ces parasites. Il est possible d'éliminer cette éventualité en utilisant des filtres d'un côté dans les liaisons des équipements perturbateurs et d'un autre côté dans les liaisons des montages qui peuvent être sensibles aux parasites. Le spectre de ces perturbations étant situé dans les hautes fréquences, il est facile d'utiliser des bobines et des condensateurs pour le filtrage (*figure 3.18*).

Les bobines lissent le courant dans les fils de ligne et les condensateurs affaiblissent les variations brusques des tensions entre les deux fils de ligne et entre fil de ligne et terre.

Les convertisseurs de tension par découpage utilisent tous une bobine ou un transformateur. Diverses configurations sont rencontrées : montages élévateurs, abaisseurs ou inverseurs. Les schémas comprennent en général un circuit intégré, une bobine, quelques résistances et condensateurs et éventuellement une diode et des transistors. Le rôle de la bobine dans ce type de montages est d'accumuler une certaine énergie pendant une phase du fonctionnement et de la restituer dans une autre phase afin de lisser le courant. On emploie des noyaux de ferrites puisque les signaux sont assez rapides (fréquences de commutation de plusieurs dizaines de kilohertz). Le filtrage final qui permet

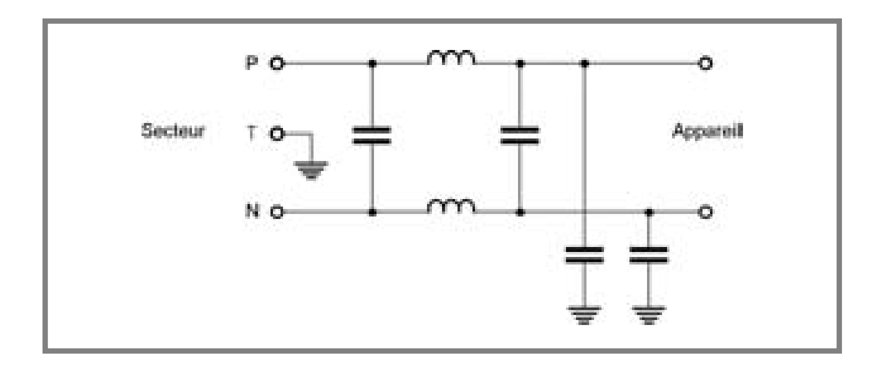


Figure 3.18 – Filtre secteur antiparasite.

d'obtenir une tension continue est effectué par un condensateur. Un exemple de convertisseur élévateur utilise un circuit intégré *Maxim* de référence MAX630 (*figure 3.19*).

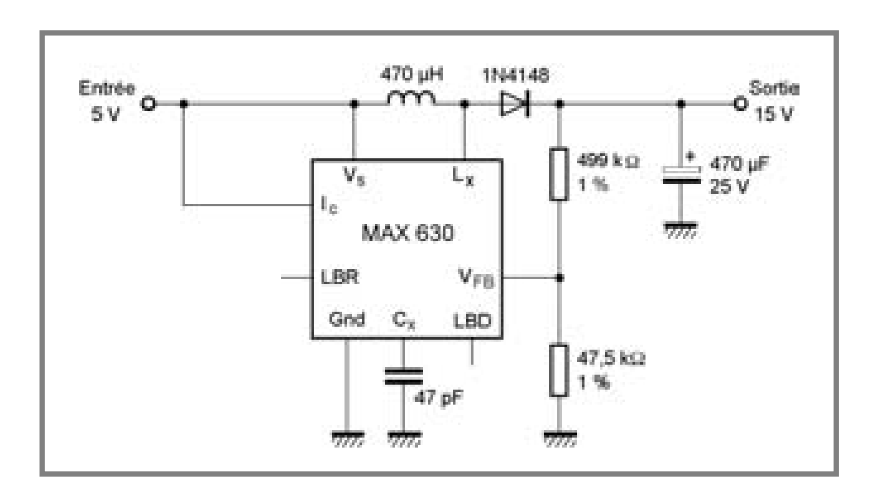


Figure 3.19 – Convertisseur élévateur de tension.

Le montage permet d'obtenir une tension fixe de 15 V à partir d'une tension disponible de 5 V. Les résistances du pont diviseur de sortie sont à 1 % (série E96) car ce sont elles qui fixent la valeur précise de la tension de sortie.

Aux fréquences élevées, on associe souvent une bobine et un condensateur pour former un circuit accordé (appelé aussi circuit résonnant ou circuit oscillant). Ce circuit a la particularité d'un filtre sélectif. On l'utilise par exemple dans les amplificateurs en classe C (*figure 3.20*).

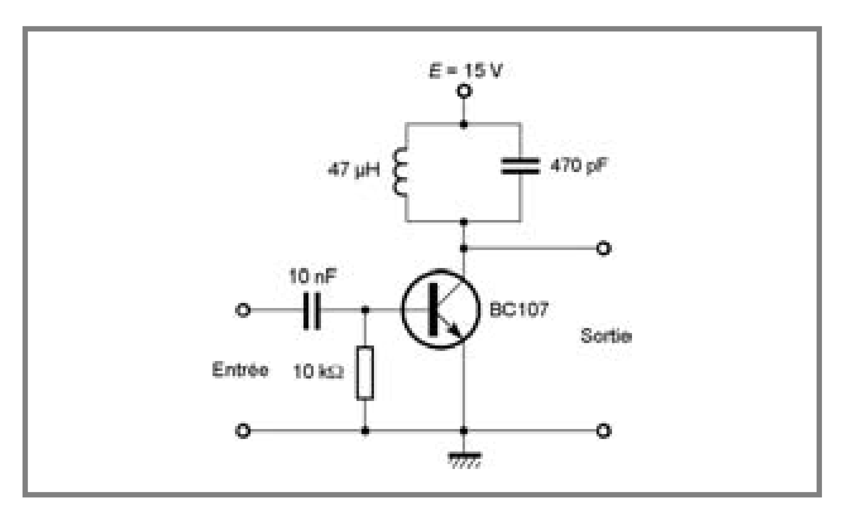


Figure 3.20 – Amplificateur sélectif en classe C.

Dans ce montage, le transistor a une polarisation de base négative à cause du condensateur d'entrée qui se charge à la mise sous tension. Le transistor ne conduit donc que pendant une brève durée à chaque période du signal d'entrée. Pour reconstituer une sinusoïde en sortie, on filtre le courant de collecteur (formé de pics) par le circuit accordé sur la fréquence d'entrée. Avec les valeurs proposées sur le schéma, la fréquence d'accord est environ 1 MHz.

Les bobines sont aussi utilisées en hautes fréquences pour la polarisation des transistors. Ce sont les bobines d'arrêt (appelées selfs de choc dans le jargon électronicien). Par exemple, on peut utiliser cette solution dans un oscillateur *LC* du type Colpitts (*figure 3.21*).

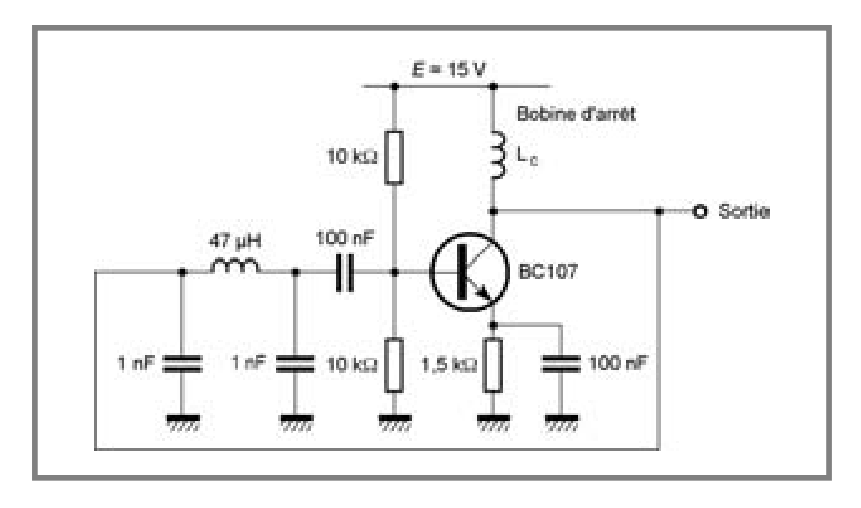


Figure 3.21 – Oscillateur Colpitts avec polarisation du collecteur par une bobine d'arrêt.

Sa fréquence d'oscillation est fixée à environ 1 MHz par la cellule formée de la bobine de 47 µH et des deux condensateurs de 1 nF. Le transistor est relié à l'alimentation du côté collecteur par une bobine d'arrêt. Pour la composante continue (polarisation), cette bobine est presque un court-circuit tandis que pour les signaux de haute fréquence, c'est presque un circuit ouvert.

Les bobines d'arrêt jouent donc le rôle inverse de celui des condensateurs de liaison. On peut ainsi aiguiller les courants continus et les courants alternatifs dans des branches différentes. De plus, il n'y a pas de pertes par effet Joule dans la bobine (en fait des pertes très faibles), contrairement à ce qui se passe dans les résistances de polarisation des amplificateurs en basses fréquences.

Le transformateur d'impulsions permet la commande des thyristors. Il transmet les impulsions issues du générateur de déclenchement en assurant un isolement galvanique entre circuit de puissance (thyristor) et circuit de commande (*figure 3.22*).

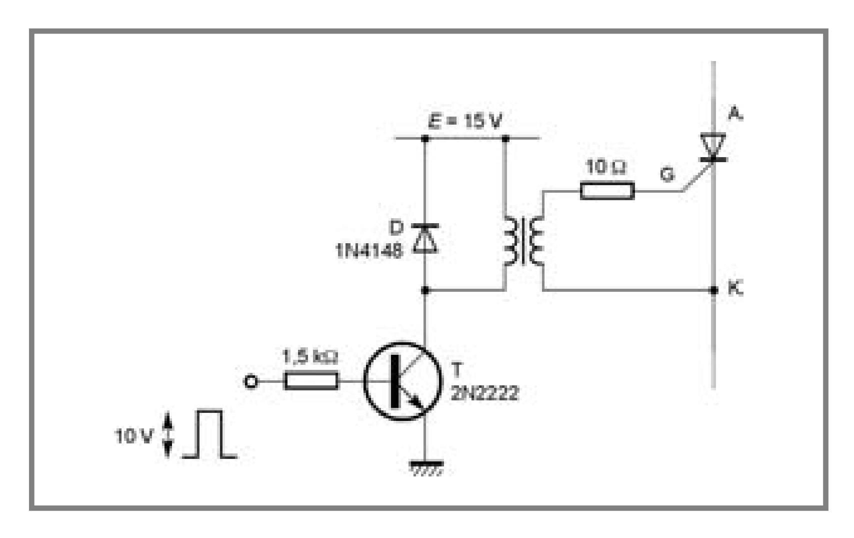
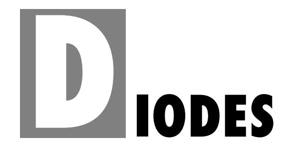


Figure 3.22 – Commande d'un thyristor par un transformateur d'impulsions.

On a représenté la commande d'un thyristor unique sans indiquer la configuration du circuit de puissance. Le primaire du transformateur est commandé par un transistor fonctionnant en commutation. D est une diode de roue libre : elle permet l'écoulement du courant lorsque le transistor est bloqué (pour démagnétiser le transformateur d'impulsions).

CHAPITRE 4



IODES

La diode est le composant à semi-conducteur le plus simple. Son usage est répandu aussi bien en électronique de signal qu'en électronique de puissance.

4.1 Principes et propriétés

Constitution

Une diode est un dipôle passif et non-linéaire. Passif parce que ce composant ne peut jamais fournir d'énergie au circuit et non linéaire parce que la tension à ses bornes n'est pas proportionnelle au courant. Pour former une diode, on utilise un matériau semi-conducteur (le silicium en général) sur lequel on crée une jonction en dopant différemment deux zones, c'est-à-dire en ajoutant des impuretés qui modifient le comportement électrique de la substance. On crée ainsi une zone P et une zone N (*figure 4.1*).

C'est la jonction qui donne à la diode ses propriétés particulières. La connexion reliée à la partie dopée P est appelée anode et celle qui est reliée à la partie N est nommée cathode.

Symboles

On représente la diode par son symbole normalisé (*figure 4.2*) ou par d'autres symboles (*figure 4.3*).

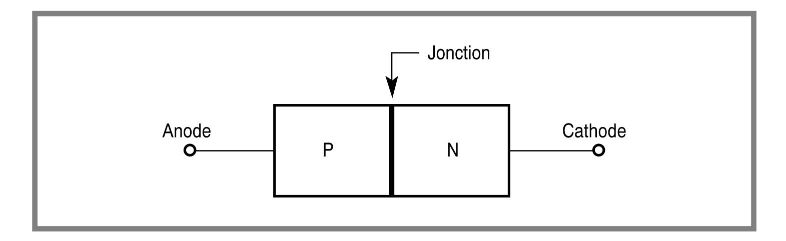


Figure 4.1 – Constitution de principe d'une diode.

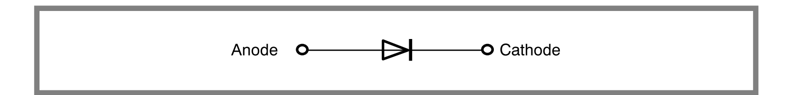


Figure 4.2 – Symbole normalisé d'une diode.

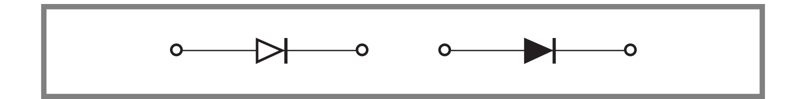


Figure 4.3 – Autres formes rencontrées pour le symbole d'une diode.

Fonctionnement

En simplifiant, on peut dire qu'une diode laisse passer le courant lorsqu'elle est branchée en polarisation directe (tension positive sur l'anode) et qu'elle bloque le passage du courant lorsque la polarisation est inverse (tension positive sur la cathode). Dans le premier cas (*figure 4.4*), on dit que la diode est passante ou conductrice et dans le second cas (*figure 4.5*), on dit que la diode est bloquée.

Si l'on regarde d'un peu plus près, on constate qu'il faut en fait un minimum de tension directe pour rendre la diode conductrice : c'est le seuil de la jonction. Pour une diode au silicium, ce seuil est de

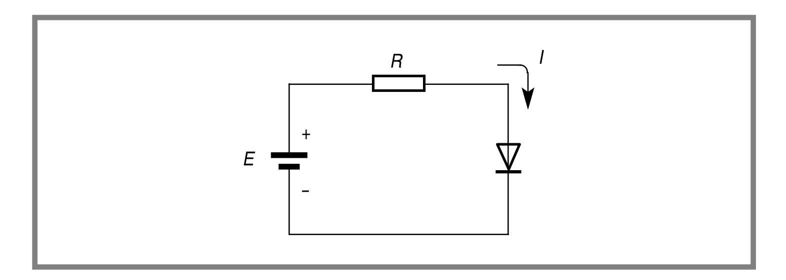


Figure 4.4 – Diode polarisée en direct.

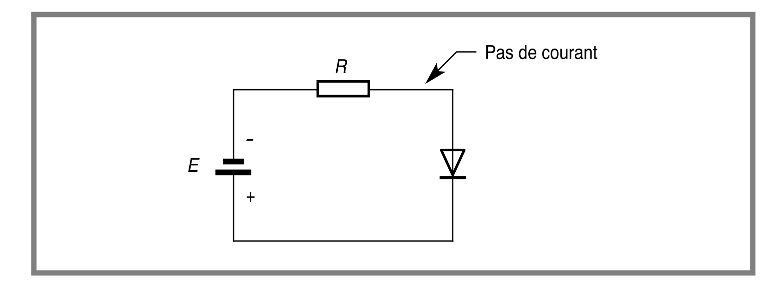


Figure 4.5 – Diode polarisée en inverse.

l'ordre de 0,6 V. Tant que la diode reste passante, la tension à ses bornes garde une valeur voisine de 0,6 à 0,7 V.

En polarisation inverse, on constate que si l'on dépasse une certaine valeur de tension, il apparaît également un courant : c'est le claquage de la jonction. Ce phénomène est dû soit à l'effet d'avalanche, soit à l'effet Zener. Le claquage n'est pas destructif à condition que le courant soit limité à une valeur raisonnable par une résistance.

Diode Zener

Lorsque la diode est utilisée dans la zone de claquage, elle conserve une tension constante à ses bornes, la valeur dépendant du composant choisi. Pour les diodes ordinaires, on cherche à rejeter ce phénomène

le plus loin possible : la tension correspondante est souvent de plusieurs centaines de volts. Dans certains cas, on veut au contraire utiliser cette zone de claquage afin de maintenir une tension constante : on fait appel pour cela à des éléments particuliers, les diodes stabilisatrices de tension ou diodes Zener, pour lesquelles la tension de claquage est faible (quelques volts ou quelques dizaines de volts).

On les représente par leur symbole normalisé (*figure 4.6*) ou par d'autres schémas (*figure 4.7*).

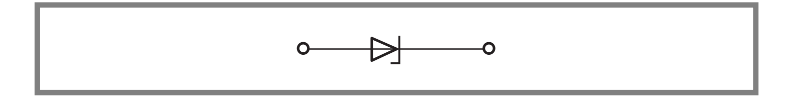


Figure 4.6 – Symbole normalisé d'une diode Zener.

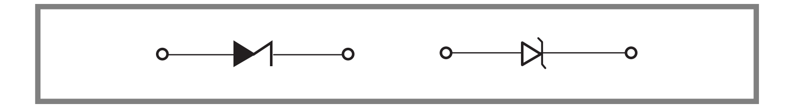


Figure 4.7 – Autres représentations utilisées pour les diodes Zener.

Diode varicap

Une diode polarisée en inverse se comporte essentiellement comme une très grande résistance (pas de courant), mais également, en régime variable, comme un petit condensateur. En effet, la jonction présente une certaine capacité, de par son fonctionnement (cette valeur est bien supérieure à une capacité parasite entre électrodes). Ce qui est intéressant pour les applications, c'est que cette capacité interne de la diode varie avec la tension appliquée au composant. On peut ainsi obtenir des condensateurs variables commandés par une tension.

Toutefois, les capacités restent faibles (quelques dizaines de picofarads). Des diodes sont spécialement prévues pour cet usage : les

diodes à capacité variable, souvent nommées varicap. On les représente par leur symbole normalisé (*figure 4.8*) ou par un autre schéma (*figure 4.9*).

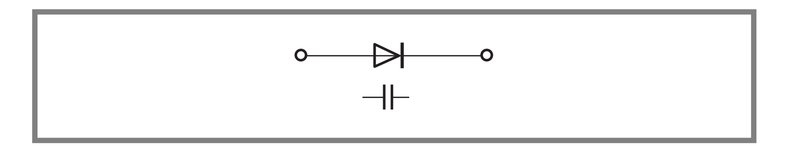


Figure 4.8 – Symbole normalisé d'une diode à capacité variable.

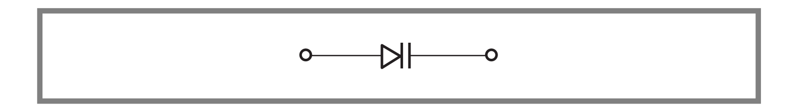


Figure 4.9 – Autre représentation rencontrée pour une diode à capacité variable.

Photodiode

Le courant inverse d'une jonction n'est pas tout à fait nul : il existe un courant de fuite. Ce dernier augmente sensiblement lorsque l'on éclaire la jonction. Ce phénomène est exploité dans les photodiodes : ce sont simplement des diodes au silicium dont la jonction peut être éclairée. On les représente par leur symbole normalisé (*figure 4.10*). On polarise la photodiode en inverse (*figure 4.11*).

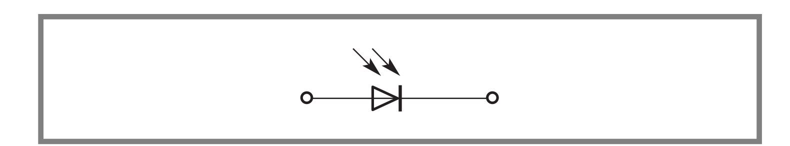


Figure 4.10 – Symbole normalisé d'une photodiode.

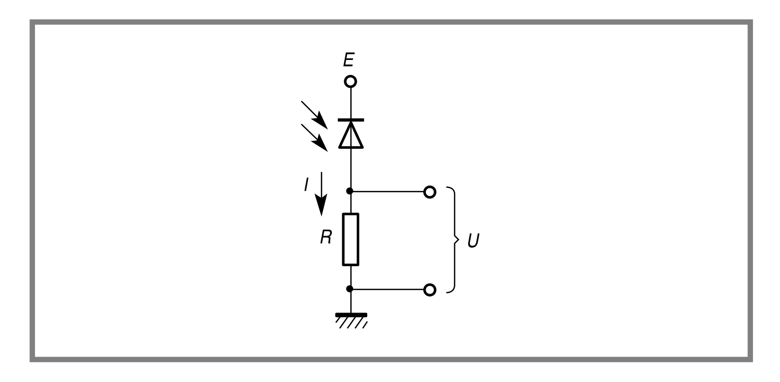


Figure 4.11 – Photodiode utilisée en capteur optique.

Le courant inverse *I* est proportionnel à l'éclairement reçu. La tension prise aux bornes de la résistance R est l'image du courant ($U = RI$). On a donc réalisé un capteur optique.

Diode électroluminescente

L'effet inverse est obtenu avec les diodes électroluminescentes (LED, *light-emitting diode*). Ce sont des composants qui émettent de la lumière quand un courant les parcourt. Ils sont utilisés comme voyants lumineux.

Ces diodes ne sont pas constituées de silicium, mais d'autres matériaux semi-conducteurs, composés de l'arséniure de gallium. De ce fait, la tension présente à leurs bornes lorsqu'elles sont conductrices n'est pas 0,6 V ; elle vaut de 1,6 V à 2,5 V suivant la couleur de la lumière émise. La chute de tension est d'autant plus élevée que la longueur d'onde est faible. On peut par exemple obtenir 1,6 V pour le rouge, 2,2 V pour le jaune et 2,3 V pour le vert (avec un courant de 10 mA).

On les représente par leur symbole normalisé (*figure 4.12*).

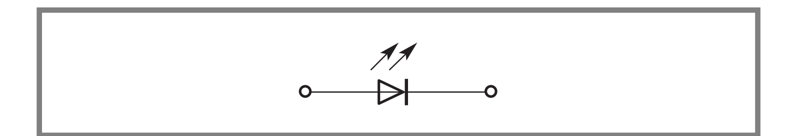


Figure 4.12 – Symbole normalisé d'une diode électroluminescente.

4.2 Caractéristiques technologiques

Limites de fonctionnement

Les principaux critères de choix d'une diode sont le courant maximal en direct, la tension maximale en inverse et la rapidité. Les ordres de grandeur de ces paramètres sont très variés : le courant maximal peut être de 100 mA pour une diode utilisée en électronique de signal, mais aussi de 100 A pour un composant faisant partie d'un convertisseur de puissance. Les présentations de ces éléments sont évidemment très différentes et les prix ne sont pas non plus du même ordre de grandeur. Nous nous limiterons ici à présenter les petites diodes qui apparaissent le plus souvent dans les réalisations électroniques. Malgré un nombre élevé de références, il n'y a en réalité que quelques catégories effectivement distinctes. On rencontre essentiellement deux types de composants : les diodes de signal et les diodes de redressement. Les premières sont rapides, mais ne supportent que des courants faibles. Les secondes acceptent des intensités plus élevées, mais sont relativement lentes. On peut citer la diode de signal la plus répandue et qui convient pratiquement toujours dans ce rôle : la diode 1N4148. Sa tension inverse est 75 V et son courant est 225 mA. Pour le redressement, on rencontre très fréquemment les diodes de la série 4000. Elles supportent 1 A et leur tension maximale dépend de la référence exacte comme l'indique le *tableau 4.1*.

Étant donné que les prix des différentes variantes sont très voisins, on peut se contenter en général de n'utiliser qu'une seule référence. En

raison de l'ordre de grandeur des tensions habituellement rencontrées, on peut par exemple choisir la diode 1N4004. Exceptionnellement, le courant maximal du composant doit être supérieur à 1 A. On fait alors appel à d'autres éléments. Les diodes 3 A sont assez souvent employées. On peut citer par exemple la référence BY255.

Tableau 4.1 – Tensions maximales des diodes de la série 4000.

Référence	1N4001	1N4002	1N4004	1N4005	1N4006	1N4007
Tension maximale (V)	50	100	400	600	800	1 000

Marquage

Les petites diodes se présentent sous une forme voisine de celle des résistances. La cathode est indiquée par un trait sur le corps du composant (*figure 4.13*).

Le marquage est souvent en clair, mais on peut parfois rencontrer des éléments marqués par un code des couleurs (*figure 4.14*).

Ponts moulés

On utilise souvent pour les redresseurs des ponts moulés qui comprennent les quatre diodes d'un montage double alternance de Graetz.

4.3 Domaines d'utilisation

La diode est très intéressante pour le redressement des signaux alternatifs. Cette fonction se rencontre surtout dans les alimentations continues, mais on l'utilise aussi pour détecter l'amplitude d'une tension (par exemple dans certains amplificateurs à commande automatique de gain). Le montage le plus simple n'utilise une seule diode (*figure 4.15*).

Si l'on applique une tension sinusoïdale à l'entrée du circuit, on obtient en sortie les alternances positives (*figure 4.16*).

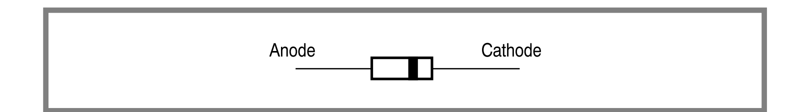


Figure 4.13 – Anneau permettant de repérer la cathode.

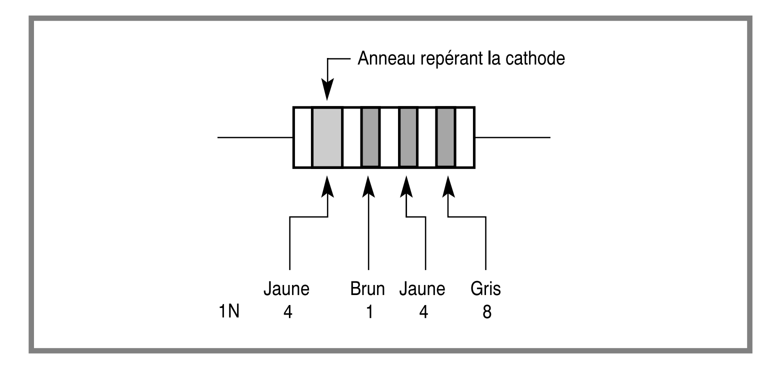


Figure 4.14 – Marquage d'une diode par le code des couleurs.

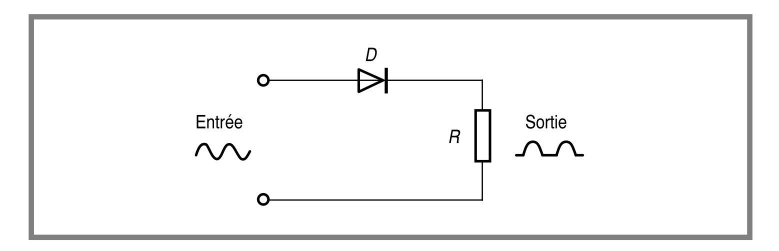


Figure 4.15 – Redresseur simple alternance.

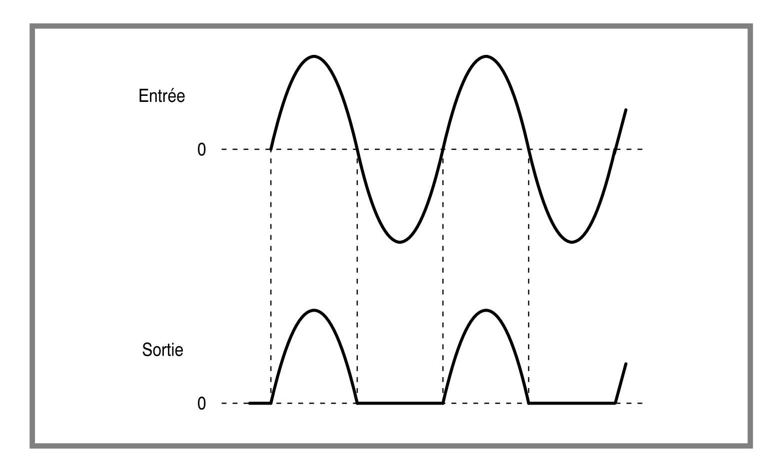


Figure 4.16 – Allure de la tension de sortie du redresseur simple alternance quand la tension d'entrée est sinusoïdale.

En effet, si l'on néglige le seuil de conduction de la diode devant l'amplitude du signal d'entrée, on constate que l'élément redresseur est polarisé en direct pendant une demi-période et polarisé en inverse pendant l'autre demi-période. Ce montage est appelé redresseur simple alternance. Pour obtenir une tension sensiblement continue, on place un condensateur en parallèle sur la résistance (*figure 4.17*).

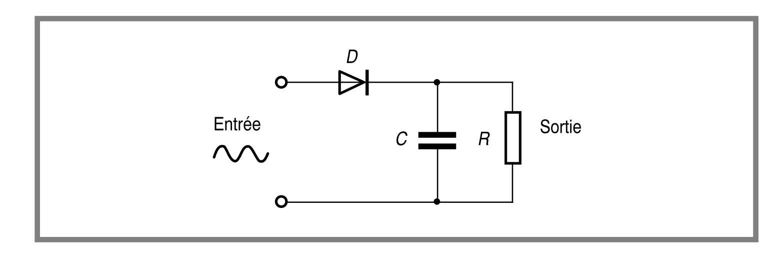


Figure 4.17 – Redresseur avec condensateur de filtrage.

On effectue ainsi un filtrage (voir chapitre 2). La tension de sortie a alors une allure proche du continu (*figure 4.18*).

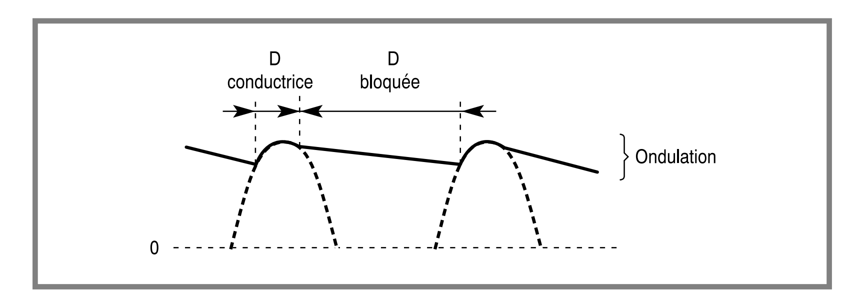


Figure 4.18 – Allure de la tension de sortie du redresseur avec condensateur de filtrage.

La diode n'est passante que pendant la durée nécessaire à la recharge du condensateur. Ce dernier assure l'alimentation de la résistance de charge lorsque la diode est bloquée. Ce montage élémentaire a des performances médiocres et n'est pas utilisé pour la conversion d'énergie (alimentations continues) mais seulement pour la détection d'amplitude d'un signal alternatif (amplificateurs, oscillateurs…). Dans ce dernier rôle, lorsque les tensions sont faibles et qu'une bonne précision est désirée, l'influence du seuil ne peut plus être négligée. L'emploi d'un amplificateur opérationnel associé à deux diodes permet de résoudre le problème (*figure 4.19*).

L'étude du fonctionnement montre que la tension de sortie est redressée simple alternance sans aucun effet de seuil. Il s'y ajoute une inversion de signe (*figure 4.20*).

Dans les alimentations continues, on utilise un redressement double alternance. Le filtrage de la tension de sortie est alors plus facile. Deux montages sont possibles : le pont de Graetz, étudié au chapitre 2 et le circuit « va-et-vient » abordé au chapitre 3.

Les diodes Zener servent surtout à la stabilisation des tensions. On peut ainsi réaliser des références de tension qui permettent d'obtenir une tension continue déterminée avec une bonne stabilité.

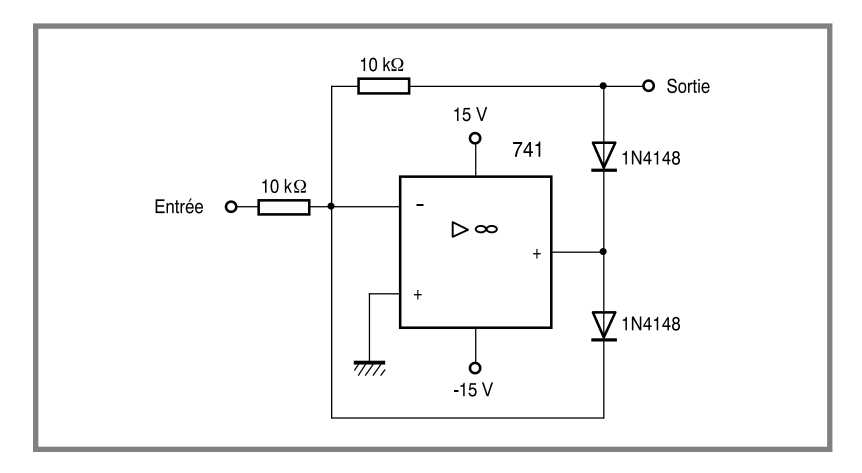


Figure 4.19 – Redresseur sans seuil.

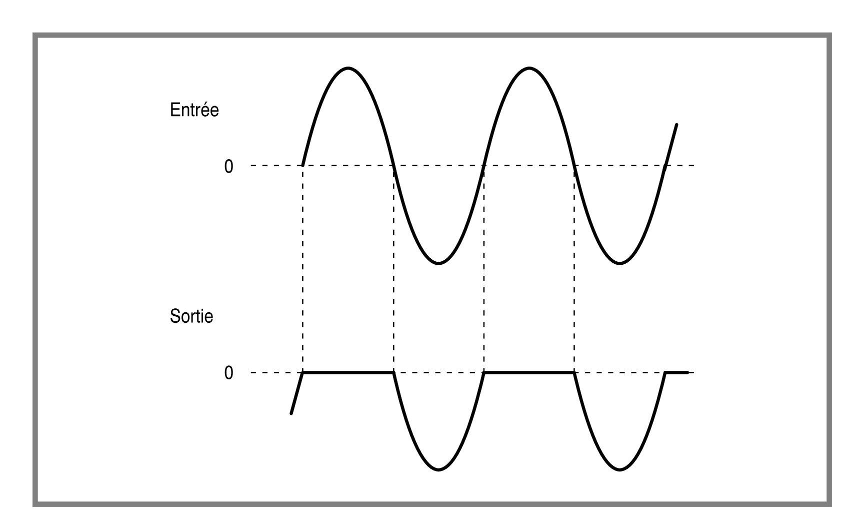


Figure 4.20 – Tension redressée sans seuil.

Il faut pour cela disposer d'une alimentation de tension *E* supérieure à la valeur demandée en sortie et associer une résistance R à la diode Zener (*figure 4.21*).

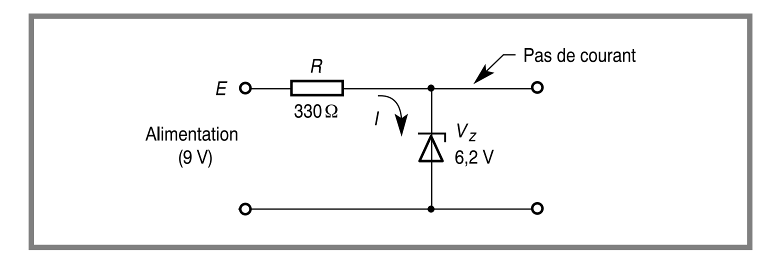


Figure 4.21 – Stabilisation de tension par diode Zener.

La diode est polarisée en inverse et elle fixe la tension à ses bornes à une valeur choisie. La différence de tension entre l'alimentation et la diode Zener donne une chute de tension dans la résistance. Si le courant débité est négligeable, le courant dans la résistance passe aussi dans la diode. Il faut respecter deux conditions : le courant ne doit pas être trop élevé pour ne pas dépasser la dissipation maximale autorisée pour la Zener, mais sa valeur ne doit pas descendre en dessous de quelques milliampères pour rester dans la zone de régulation de la diode. On en déduit un minimum et un maximum pour la valeur de *R* si la puissance de la diode est imposée. On a toutefois intérêt à choisir le courant le plus faible possible pour économiser l'alimentation. On se place donc un peu au-dessus du minimum en prenant par exemple 10 mA. Avec une alimentation de 9 V et une diode Zener de 6,2 V, on calcule :

$$R = \frac{E - V_Z}{I}$$

soit :

$$R = \frac{9 - 6,2}{0,01} = 280\ \Omega$$

On prend la valeur normalisée immédiatement supérieure dans la série E12, 330 Ω. La puissance dissipée dans la Zener est alors :

$$P_Z = V_Z I = V_Z \frac{E - V_Z}{R}$$

soit :

$$P_Z = 6{,}2 \times \frac{9 - 6{,}2}{330} = 0{,}053 \text{ W} \quad (53 \text{ mW})$$

Les diodes Zener courantes peuvent dissiper 400 mW, ce qui convient ici. Il reste à calculer la puissance dans la résistance :

$$P_R = \frac{(E - V_Z)^2}{R}$$

soit :

$$P_R = \frac{(9 - 6{,}2)^2}{330} = 0{,}024 \text{ W} \quad (24 \text{ mW})$$

Une résistance $^1/_4$ W convient bien.
On ne peut pas utiliser ce montage pour fournir un courant de sortie important, mais on peut lui demander quelques milliampères. Le courant dans la résistance n'est plus alors égal au courant dans la diode. Il faut appliquer la loi des nœuds (*figure 4.22*) :

$$I = I_Z + I_L$$

Pour un courant demandé de 5 mA, on a :

$$I = 10 + 5 = 15 \text{ mA}$$

La valeur de résistance devient :

$$R = \frac{9 - 6{,}2}{0{,}015} = 187\ \Omega$$

On choisit donc la valeur normalisée supérieure 220 Ω. Le reste du calcul est analogue.

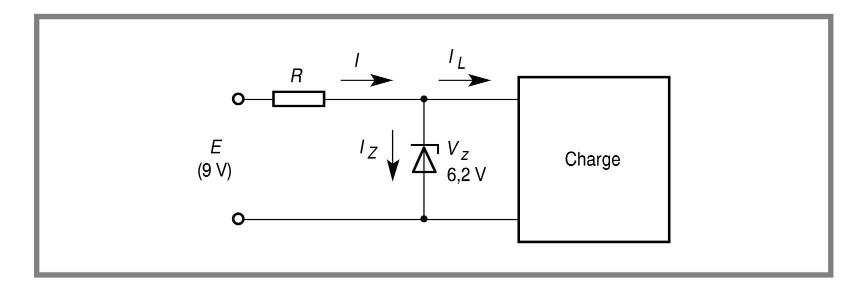


Figure 4.22 – Stabilisateur chargé.

Il est facile de réaliser une petite alimentation stabilisée quand le courant débité reste faible (*figure 4.23*).

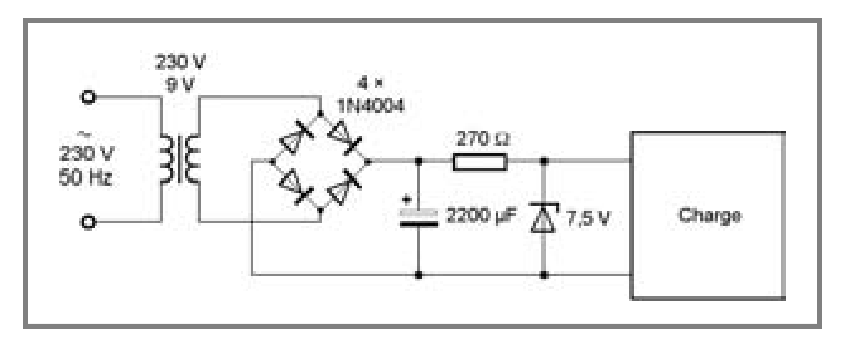


Figure 4.23 – Alimentation stabilisée pour faible débit.

La tension du secteur est abaissée par un transformateur qui assure également l'isolement. Un pont de diodes effectue le redressement, le filtrage étant obtenu par un condensateur chimique. La diode Zener et la résistance associée permettent de stabiliser la tension de sortie à 7,5 V. Ce montage très simple ne convient que pour des courants limités à quelques milliampères. Lorsque l'on a besoin d'un courant plus élevé, il faut faire appel à des transistors, ou, plus souvent, à des régulateurs intégrés (voir chapitre 6).

Dans certains montages, les diodes ont un rôle de protection : elles limitent certaines tensions afin d'éviter le dépassement de valeurs maximales autorisées. Par exemple, considérons un comparateur à amplificateur opérationnel (*figure 4.24*).

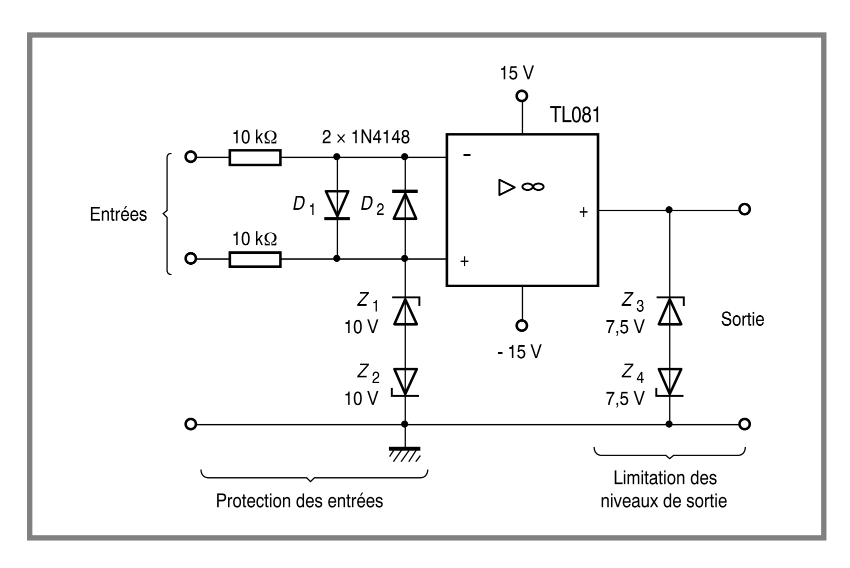


Figure 4.24 – Comparateur à amplificateur opérationnel.

La sortie est à l'état haut (8,1 V) si la tension appliquée à l'entrée E_1 est supérieure à la tension sur l'entrée E_2, et à l'état bas (– 8,1 V) dans le cas contraire. Si les bornes d'entrée sont accessibles, on risque d'y appliquer des tensions destructrices pour le circuit intégré. En effet, un amplificateur opérationnel a deux sortes de limitations d'entrée : la tension appliquée sur ces bornes ne doit pas dépasser 15 V (ou la tension d'alimentation si celle-ci est inférieure à 15 V) et la différence des tensions sur les entrées ne doit pas excéder 30 V (une Zener passante en inverse et l'autre en direct). Les diodes Zener Z_1 et Z_2 limitent la tension sur l'entrée + à 10,6 V, dans un sens et dans l'autre. Les diodes D_1 et D_2 limitent la différence des

tensions d'entrée à 0,6 V dans un sens et dans l'autre. La tension présente sur l'entrée – est limitée par l'ensemble à 11,2 V (une diode ordinaire passante en série avec les deux diodes Zener). Le fonctionnement du comparateur n'est pas affecté par les protections car le signe de la différence des tensions n'est pas modifié.

Les diodes Zener Z_3 et Z_4 branchées en sortie de l'amplificateur opérationnel ont pour rôle de fixer les niveaux de tension. En leur absence, l'amplificateur opérationnel serait saturé, soit positivement, soit négativement, et la tension de sortie vaudrait environ – 14 V ou 14 V pour une alimentation double de – 15 V et 15 V. L'une des diodes Zener est passante en sens inverse et l'autre en sens direct. La tension de sortie peut ainsi prendre les valeurs 8,1 V (un seuil de 0,6 V ajouté à la tension de Zener 7,5 V) et – 8,1 V. Cela permet d'adapter les niveaux de sortie à l'utilisation indépendamment de l'alimentation. Les valeurs de tension sont également mieux connues car les tensions de saturation d'un amplificateur opérationnel sont des paramètres dont on ne connaît que l'ordre de grandeur (1 à 2 V en dessous de l'alimentation). On remarque qu'ici aucune résistance n'est associée aux diodes Zener de sortie. Cela est dû au fait que le circuit intégré limite lui-même son courant de sortie (à environ 20 ou 30 mA).

On a déjà rencontré au chapitre 3 une diode de roue libre dans un circuit de commande de thyristor par transformateur d'impulsions. On utilise cette configuration à chaque fois que l'on commande un circuit inductif (bobine, transformateur…) par un transistor en commutation. En effet, lors du blocage du transistor, il faut que le courant dans la bobine puisse continuer à s'écouler pour assurer l'évacuation de l'énergie électromagnétique emmagasinée. Voici quelques exemples d'applications souvent rencontrées : commande de relais (*figure 4.25*), convertisseurs et alimentations à découpage, hacheur pour moteur à courant continu…

Les diodes sont aussi employées comme aiguillage de courant (*figure 4.26*).

Le montage est un générateur d'impulsions dont on fixe la durée grâce au courant aiguillé par les diodes dans deux résistances différentes suivant son sens (*figure 4.27*).

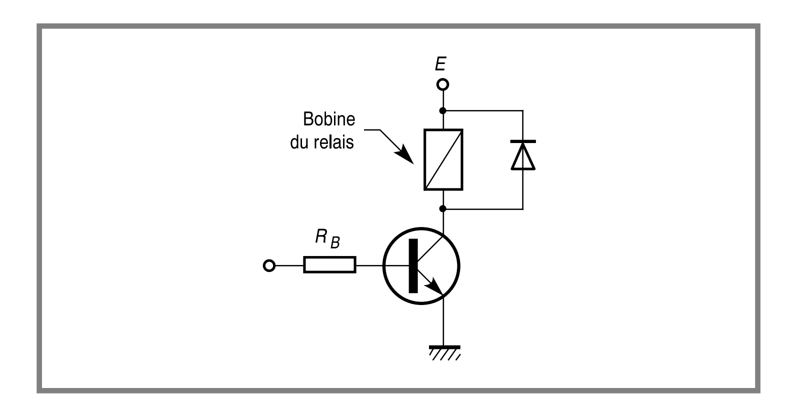


Figure 4.25 – Commande d'un relais par un transistor et une diode de roue libre.

L'amplificateur opérationnel, associé aux deux résistances de 100 kΩ forme une bascule à hystérésis (trigger de Schmitt). Le condensateur se charge alternativement dans un sens et dans l'autre entre les deux seuils du trigger. Quand la sortie est à l'état haut, le courant traverse la résistance $R_1 = 390\ \Omega$ tandis que quand la sortie est à l'état bas, le courant, de sens inverse, traverse la résistance $R_2 = 39\ \text{k}\Omega$. Les diodes servent à aiguiller le courant dans des branches différentes pour obtenir des durées inégales pour l'état haut et l'état bas. On chiffre la dissymétrie de ces durées par le rapport cyclique :

$$\alpha = \frac{t_1}{t_1 + t_2}$$

C'est le quotient de la durée de l'état haut par la période. Le résultat est souvent donné en pourcentage. Pour le montage considéré, le rapport cyclique est fixé par R_1et R_2 suivant la formule :

$$\alpha = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

ce qui donne :

$$\alpha = \frac{390}{390 + 39\ 000} = 0{,}01 \quad \text{soit} \quad 1\ \%$$

Figure 4.26 – Générateur d'impulsions.

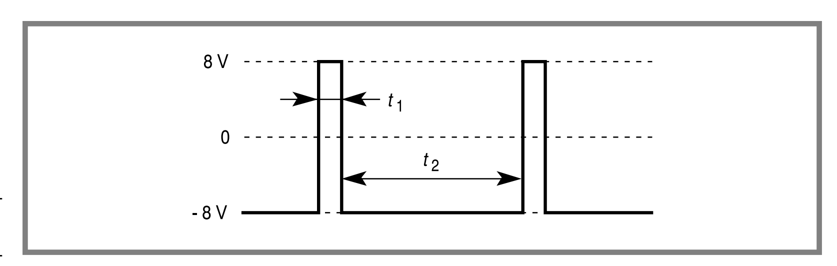


Figure 4.27 – Allure de la tension de sortie du générateur d'impulsions (la largeur du pic est volontairement exagérée).

La fréquence du signal de sortie est :

$$f = \frac{0{,}91}{(R_1 + R_2)\,C}$$

Avec les valeurs numériques du schéma, la fréquence est voisine de 1 kHz.

Il faut noter qu'il est nécessaire d'utiliser un amplificateur opérationnel suffisamment rapide dans ce montage. En effet, même si la fréquence n'est pas très élevée (1 kHz), la durée du pic est assez brève (environ 10 µs). Un circuit du type TL081 peut convenir, mais un classique 741 est trop lent.

CHAPITRE 5

TRANSISTORS

Le transistor est l'élément de base de l'électronique moderne. Si les circuits intégrés sont formés d'un grand nombre de transistors regroupés sur la même pastille de semi-conducteur, on trouve aussi dans beaucoup de domaines des transistors discrets (un seul élément par boîtier).

5.1 Principe et propriétés

Il existe trois catégories de transistors : les transistors bipolaires, les transistors à effet de champ à jonction et les transistors MOS.

Transistors bipolaires

Constitution

Ce sont les composants les plus répandus. On les nomme souvent simplement transistors, sans autre qualificatif. Bien que le principe du transistor à effet de champ soit connu depuis plus longtemps que celui du transistor bipolaire, c'est ce dernier qui a fait l'objet des premières réalisations. Issu des recherches menées pendant la seconde guerre mondiale, le transistor est apparu en 1948.

Un transistor est formé d'un barreau de semi-conducteur dans lequel on a créé deux jonctions. On obtient ainsi trois zones dopées de façons différentes. Deux variantes apparaissent suivant la nature des dopages (P ou N) : le transistor NPN (*figure 5.1*) et le transistor PNP (*figure 5.2*).

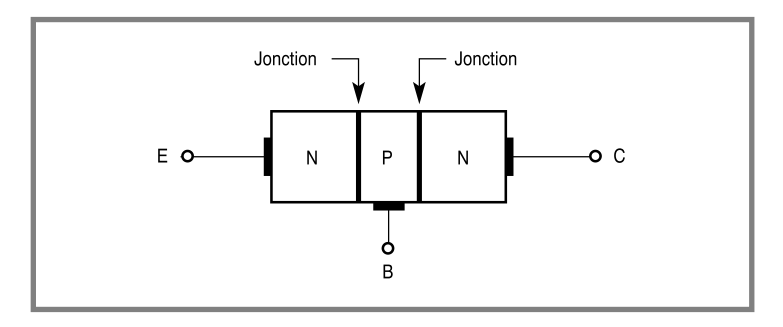


Figure 5.1 – Constitution de principe d'un transistor NPN.

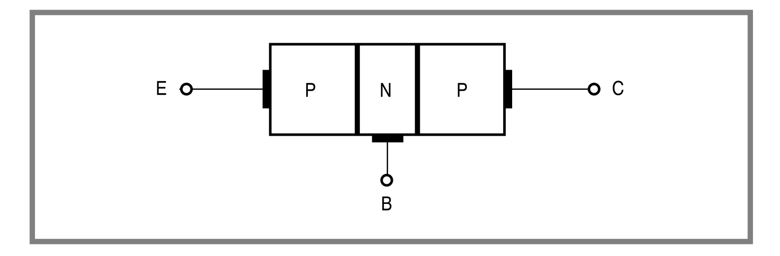


Figure 5.2 – Constitution de principe d'un transistor PNP.

Symboles

On représente les transistors par leurs symboles normalisés (*figure 5.3*).

Principe

Les trois bornes sont appelées base (B), émetteur (E) et collecteur (C). Le transistor est un tripôle (élément à trois bornes), mais on l'utilise souvent comme un quadripôle, en choisissant une borne commune à l'entrée et la sortie.

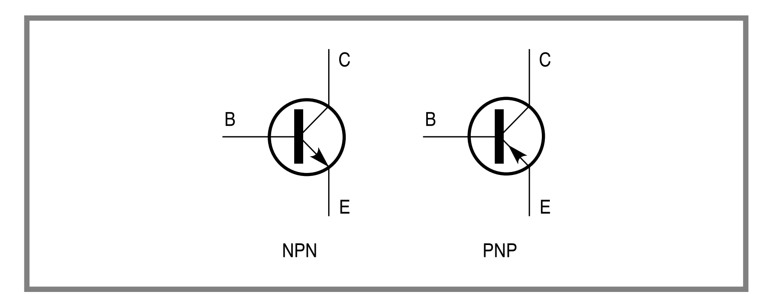


Figure 5.3 – Symboles normalisés des transistors.

Dans le montage de base, on a relié un générateur de tension continue E_C et une résistance R_C entre le collecteur et l'émetteur du transistor et un autre générateur de tension continue E_B et une résistance R_B entre base et émetteur (*figure 5.4*).
L'entrée du montage est côté base, la sortie est côté collecteur et l'émetteur est la borne commune aux circuits d'entrée et de sortie : on dit que le transistor est monté en émetteur commun. En faisant varier la tension E_B, on peut atteindre les différents régimes de fonctionnement du transistor. Si les polarités du générateur E_B sont

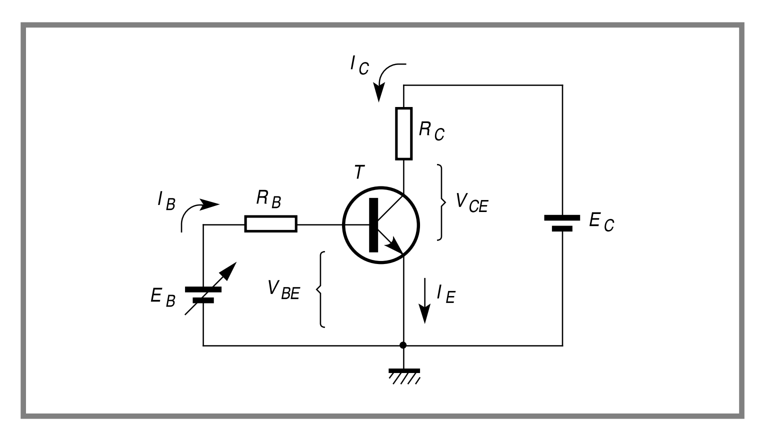


Figure 5.4 – Transistor en émetteur commun (schéma de principe).

inversées par rapport à celles de la figure, il n'y a aucun courant dans le montage : le transistor est bloqué. La tension V_{CE} entre collecteur et émetteur est égale à E_C puisqu'il n'y a aucune chute de tension dans R_C. La tension V_{BE} est égale à E_B (*figure 5.5*).

Quand on met le générateur E_B dans le sens indiqué sur la figure (pôle + du côté de la base), il n'y a toujours aucun courant si E_B ne dépasse pas un seuil d'environ 0,6 V (comme pour une diode). Lorsque E_B a dépassé 0,6 V, il apparaît des courants dans les différentes branches du circuit. Si l'on fait croître E_B, ces courants augmentent, la tension de base V_{BE} reste pratiquement constante (égale à 0,6 V) et la tension de collecteur V_{CE} diminue progressivement. Le courant de base I_B est assez faible devant les courants de collecteur I_C et d'émetteur I_E. Comme la tension V_{BE} est sensiblement constante, on peut facilement calculer I_B par la loi d'Ohm :

$$I_B = \frac{E_B - V_{BE}}{R_B} \quad \text{avec} \quad V_{BE} \approx 0{,}6\ \text{V}$$

Le courant de collecteur augmente proportionnellement au courant de base :

$$I_C = \beta I_B$$

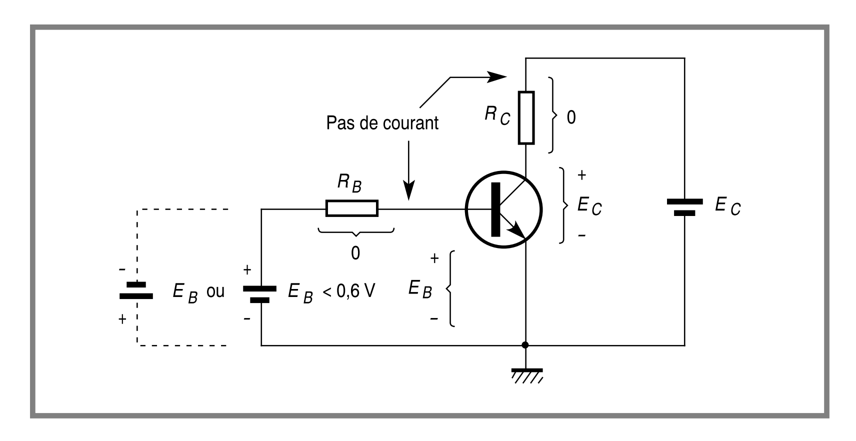


Figure 5.5 – Transistor bloqué.

β (bêta) est un paramètre caractéristique du transistor nommé amplification en courant ou plus simplement gain. Son ordre de grandeur est variable : plusieurs centaines pour les petits transistors, quelques dizaines pour les composants de plus forte puissance. Le courant I_C crée une chute de tension dans R_C qui a pour conséquence de faire baisser la tension de collecteur :

$$V_{CE} = E_C - R_C I_C$$

Le courant d'émetteur I_E est la somme du courant de collecteur I_C et du courant de base I_B :

$$I_E = I_C + I_B$$

Comme I_B est en général faible devant I_C (à condition que β soit assez grand), on peut confondre I_E et I_C :

$$I_E \approx I_C$$

Dans ce fonctionnement, le transistor est conducteur. On peut résumer les différents résultats sur un schéma (*figure 5.6*).

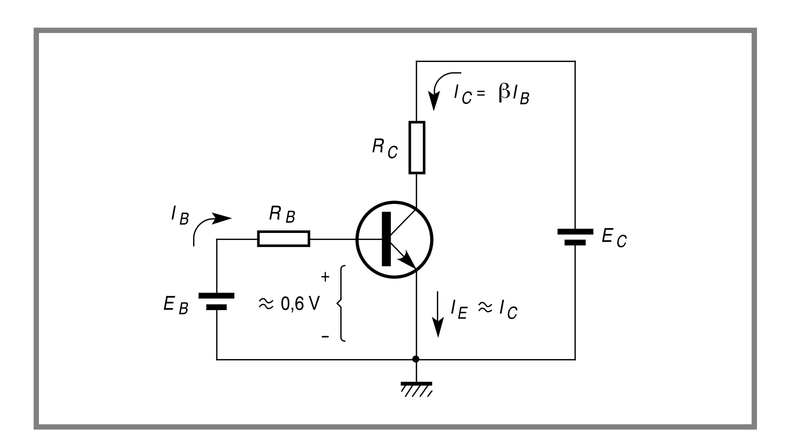


Figure 5.6 – Transistor passant.

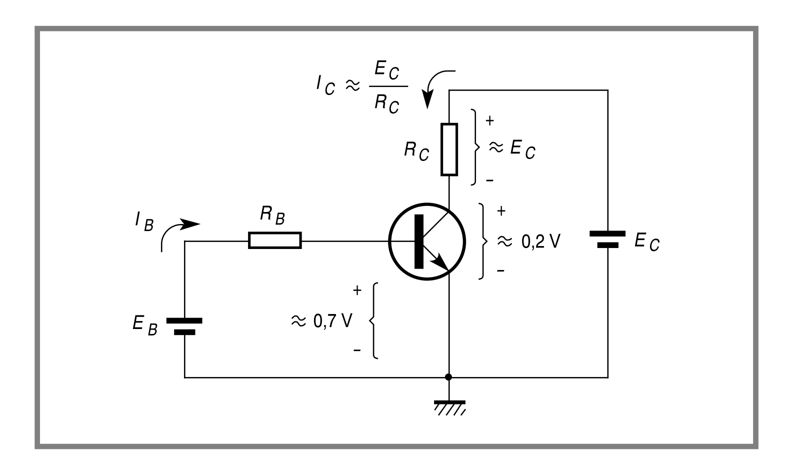


Figure 5.7 – Transistor saturé.

Si l'on continue à augmenter E_B, il arrive un moment où le courant I_C cesse de croître : le transistor est saturé (*figure 5.7*).

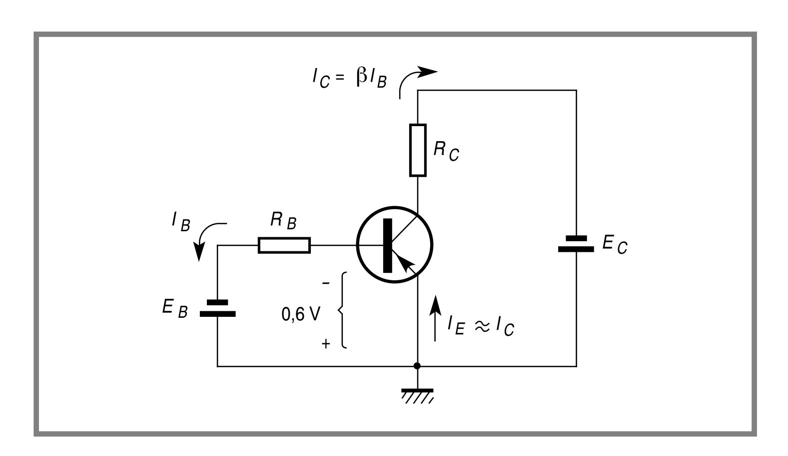


Figure 5.8 – Polarités pour un transistor PNP.

La tension V_{CE} est pratiquement nulle (quelques dixièmes de volt) et la chute de tension aux bornes de la résistance de collecteur est pratiquement égale à E_C.

Les deux états extrêmes, blocage et saturation, correspondent à un transistor qui fonctionne comme un interrupteur placé entre collecteur et émetteur et commandé par la base. On dit que le fonctionnement est en commutation. L'état conducteur est utilisé pour les applications en amplification.

Le raisonnement a été fait pour un transistor NPN (le plus courant). Pour un transistor PNP, les résultats sont analogues, mais les polarités des tensions et les sens des courants sont modifiés (*figure 5.8*).

Transistors à effet de champ à jonction

Bien qu'ils soient beaucoup moins répandus que les transistors bipolaires, les transistors à effet de champ sont intéressants dans certaines applications. On les désigne par TEC ou par FET (*field effect transistor*). On trouve aussi l'appellation plus complète mais un peu vieillie de JFET (*junction field effect transistor*). Ce composant est formé d'un barreau de semi-conducteur dont les extrémités sont la source (S) et le drain (D). Une jonction, normalement bloquée, est créée par la grille (G). Selon la nature du dopage du barreau, on distingue les TEC canal N ou canal P. Suivant la tension appliquée entre grille et source, le canal situé entre drain et source va plus ou moins se rétrécir et en conséquence le courant va être modifié. Comme la jonction de grille est bloquée, il n'y a aucun courant qui circule dans cette électrode. C'est là un avantage certain du TEC sur le transistor bipolaire. La commande ne nécessite aucune puissance. La grandeur d'entrée est la tension V_{GS} entre grille et source alors que c'est le courant de base I_B pour le transistor bipolaire. On dit qu'un TEC est commandé en tension alors qu'un transistor bipolaire est commandé en courant. On représente les transistors à effet de champ par leurs symboles normalisés (*figure 5.9*). On rencontre d'autres schématisations, mais elles ont l'inconvénient de ne pas permettre de distinguer le drain de la source (*figure 5.10*).

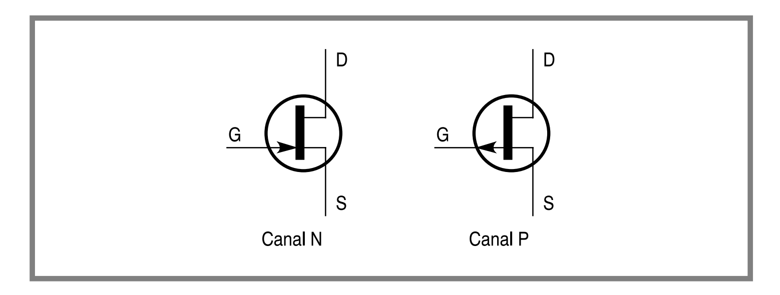


Figure 5.9 – Symboles normalisés des TEC.

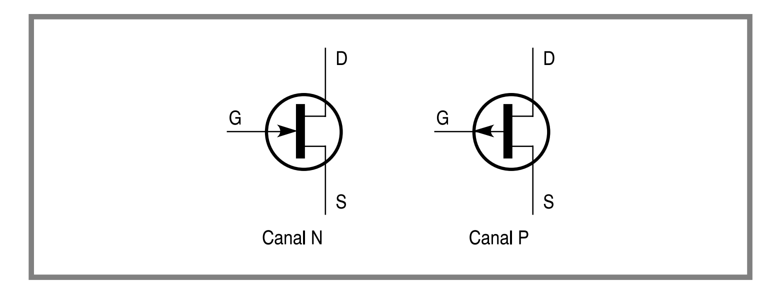


Figure 5.10 – Autres représentations des TEC.

Transistors MOS

Les transistors MOS sont aussi des éléments à effet de champ, mais la grille, au lieu d'être une jonction bloquée, est un isolant (oxyde). Le symbole MOS signifie *metal-oxyde-semiconductor*. L'appellation complète, un peu vieillie, est MOSFET (*metal-oxyde-semiconductor field effect transistor*). On nomme aussi ce composant transistor à effet de champ à grille isolée, ce qui correspond aux initiales IGFET (*insulated gate field effect transistor*). On retrouve les deux types de canaux, N ou P. On distingue également les MOS à appauvrissement (*depletion*) et les MOS à enrichissement (*enhancement*).

Les premiers fonctionnent comme les TEC à jonction : le canal se rétrécit lorsque l'on applique une tension de grille. Les seconds

n'ont pas de canal préalable. C'est la tension appliquée qui permet la création de ce canal. Les symboles permettent de distinguer les différents types de transistors MOS (*figure 5.11*). Des représentations symétriques (qui ne distinguent pas la source et le drain) sont parfois employées.

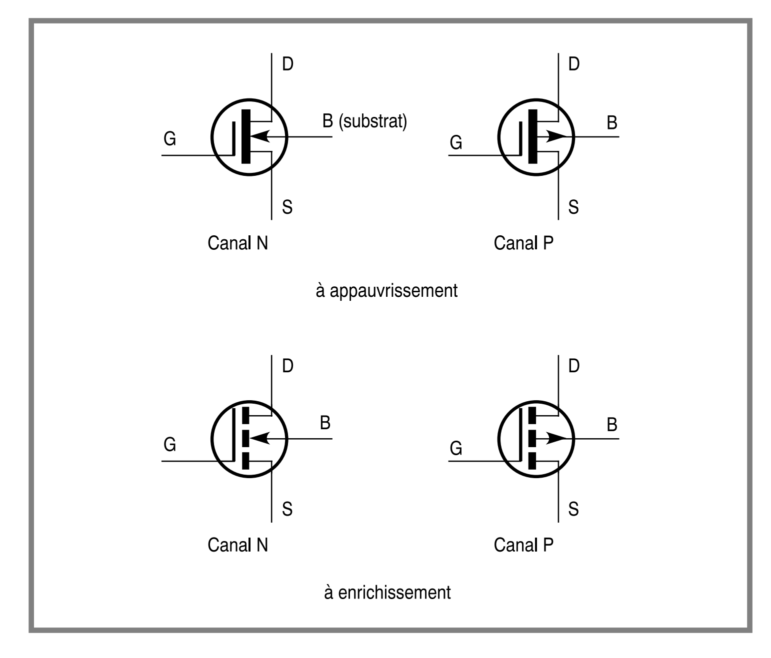


Figure 5.11 – Symboles normalisés des transistors MOS.

Phototransistors

Dans le domaine de l'optoélectronique, on rencontre des phototransistors qui sont utilisés comme capteurs de la même manière que les photodiodes (*figure 5.12*).

La conduction étant commandée par l'éclairement et non par un courant de base, cette dernière électrode n'est parfois pas sortie.

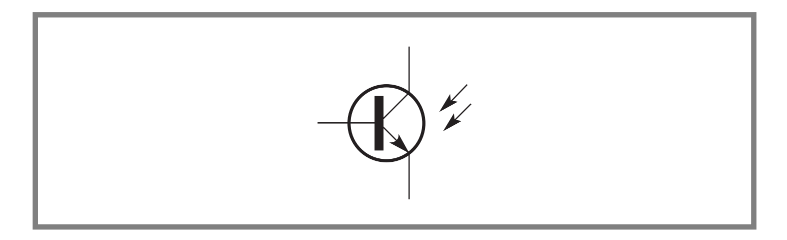


Figure 5.12 – Symbole normalisé du phototransistor.

Photocoupleurs

Une configuration particulièrement intéressante est le photocoupleur ou optocoupleur. Il s'agit de l'association, dans un même boîtier, d'une diode électroluminescente et d'un phototransistor (*figure 5.13*). Ce circuit permet de transmettre un signal en assurant un isolement entre deux parties du montage. Ce rôle est similaire à celui du transformateur, mais les domaines d'application sont différents.

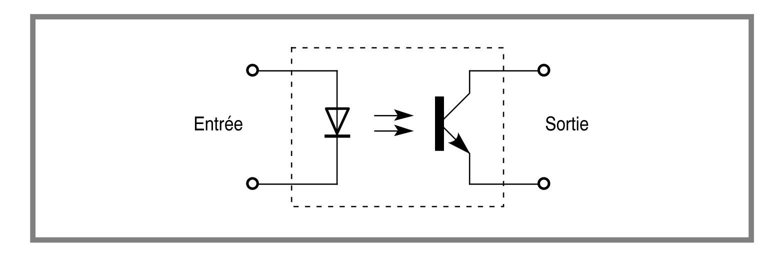


Figure 5.13 – Photocoupleur.

5.2 Caractéristiques technologiques

Transistors bipolaires

Il existe un très grand nombre de références différentes pour les transistors. Le choix peut paraître difficile, mais en fait, dans bon nombre

d'applications, seuls quelques paramètres sont importants et beaucoup de modèles différents peuvent convenir. Il faut d'abord déterminer le type de transistor à employer. Les composants les plus courants sont les transistors bipolaires NPN. On emploie des transistors PNP dans certains cas particuliers, en général en association avec des NPN. On peut citer l'amplificateur de puissance classe B qui utilise deux transistors complémentaires (un NPN et un PNP de caractéristiques similaires), et les transistors PNP dont on relie l'émetteur du côté alimentation positive pour éviter une inversion du signal de commande. Il faut noter que dans les montages assez anciens, on trouve au contraire surtout des transistors du type PNP (au germanium).

Transistors à effet de champ

Les TEC sont utilisés dans quelques applications spécifiques. Le fait qu'ils ne nécessitent pas de courant de grille les rend particulièrement intéressants dans les étages d'entrée des amplificateurs. Dans certains cas, on peut aussi utiliser un TEC comme résistance commandée par une tension. Les TEC présentent également des avantages pour la réalisation des commutateurs analogiques. Pratiquement tous les transistors à effet de champ utilisés sont à canal N. Les composants à canal P, de moindres performances, ne sont choisis qu'en cas d'absolue nécessité. De plus, il n'existe pas de TEC (à jonction) de puissance.

Transistors MOS

Par contre, les transistors MOS sont peu répandus comme composants discrets de petite puissance, mais on les rencontre de plus en plus comme éléments de commutation de puissance. Dans ce domaine, ils sont en concurrence avec les transistors bipolaires, présents depuis plus longtemps.

Transistors dans les circuits intégrés

Les composants utilisés dans les circuits intégrés sont souvent des transistors bipolaires (famille logique TTL, circuits analogiques), parfois associés avec des TEC pour les étages d'entrée (amplifica-

teurs opérationnels *bifet*), mais aussi beaucoup de transistors MOS, en particulier dans une configuration complémentaire canal N, canal P (famille logique CMOS, mais aussi circuits analogiques).

Critères de choix

Les principaux critères de choix d'un transistor discret sont ses limites absolues (tension, courant et surtout puissance) et sa rapidité. Par exemple, pour un transistor bipolaire de type NPN, les valeurs maximales portent sur la tension entre collecteur et émetteur (V_{CE}), le courant de collecteur (I_C) et la puissance totale, à peu près égale à $V_{CE}I_C$. La limite sur la tension entre base et émetteur est également très importante, mais ce n'est pas en général un critère de choix du transistor, plutôt un paramètre à prendre en compte lors de la conception du montage. Pour chiffrer les ordres de grandeurs, un petit transistor courant, du type 2N2222 a pour limites :

$$(V_{CE})_{max} = 30 \text{ V}$$

$$(I_C)_{max} = 0{,}8 \text{ V}$$

$$P_{max} = 0{,}5 \text{ W}$$

La rapidité d'un transistor peut être chiffrée par la fréquence de transition f_T. Il faut toutefois prendre garde que ce nombre en général très élevé (f_T = 250 MHz pour le 2N2222) n'est pas du tout une fréquence maximale de fonctionnement. Tout d'abord, la fréquence de transition se définit en régime sinusoïdal et ne s'applique pas directement aux signaux réels qui contiennent des harmoniques (composantes sinusoïdales de fréquences multiples de celle du signal). De plus, f_T est la fréquence pour laquelle β est égal à 1, c'est-à-dire que le transistor ne sert alors plus à rien. Un paramètre plus significatif est la fréquence de coupure f_β du transistor : c'est la fréquence à laquelle β vaut 0,7 fois sa valeur en continu (ce qui correspond à un affaiblissement de 3 dB). f_β est reliée à f_T par la formule :

$$f_\beta \beta = f_T$$

Par exemple, la valeur maximale de β pour un transistor 2N2222 est 300. La fréquence de coupure est alors, dans le cas le plus défavorable :

$$f_\beta = \frac{250}{300} = 0{,}83 \text{ MHz}$$

Bien que le gain ait diminué, le transistor reste utilisable au-delà de la fréquence de coupure. En effet, dans beaucoup de montages il faut simplement que β soit supérieur à un minimum fixé, sa valeur exacte n'étant pas importante. C'est pour cela que β n'est pas un paramètre déterminant dans le choix d'un composant. Les dispersions sur ce gain sont en général très élevées et les constructeurs ne donnent qu'un minimum et un maximum.

Par exemple, pour le 2N2222, β est compris entre 100 et 300. Ce sont des ordres de grandeur fréquents pour les petits transistors. Toutefois, il faut avoir à l'esprit que les transistors de plus fortes puissances ont des gains plus faibles.

Boîtiers

Les transistors sont présentés dans des boîtiers très divers. Pour les petites puissances, on rencontre des boîtiers en plastique (TO-92) ou en métal (TO-18, TO-39…). Les transistors de plus fortes puissances utilisent souvent des gros boîtiers métalliques (TO-3) ou plutôt, pour les composants plus récents, des boîtiers en plastique avec un petit dissipateur métallique (TO-220).

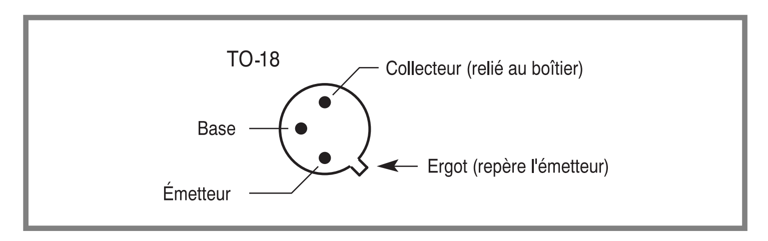


Figure 5.14 – Brochage du transistor 2N2222 (vue de dessous).

Les brochages sont donnés en vue de dessous (contrairement aux circuits intégrés). Prenons comme exemple 2N2222 en boîtier TO-18 (*figure 5.14*). L'ergot permet de repérer l'émetteur. Le collecteur est relié électriquement au boîtier.

5.3 Domaines d'utilisation

Le transistor peut remplir de multiples fonctions dans tous les domaines de l'électronique. Toutefois, l'avènement des circuits intégrés a considérablement diminué le rôle des transistors discrets en permettant de simplifier la conception des montages. Certaines applications restent cependant du ressort des transistors : la puissance, les hautes fréquences et la Hi-Fi. On rencontre également quelques transistors dans les montages à circuits intégrés : ils remplissent des fonctions d'adaptation de niveaux de tension ou de courant.

Le rôle premier du transistor est l'amplification. Un étage amplificateur en émetteur commun a été vu au chapitre 1. Ce montage n'est pas utilisé seul car ses performances sont médiocres. Il est associé à d'autres étages pour former une chaîne d'amplification. Chaque étage a un rôle particulier : les étages d'entrée (préamplificateurs) permettent d'obtenir une grande impédance d'entrée pour ne pas perturber la source de signal (on y utilise notamment des TEC), les étages intermédiaires fournissent le gain en tension nécessaire et les étages de sortie amènent une amplification du courant afin que la puissance soit suffisante pour la charge. Les performances de l'ensemble sont améliorées par une contre-réaction (boucle de retour ramenant une fraction du signal de sortie à l'entrée). Cette structure est celle des amplificateurs utilisés dans le domaine audio. Hormis ce type d'application, les amplificateurs pour signaux de basses fréquences sont intégrés. En effet, l'amplificateur opérationnel permet de réaliser de tels montages avec une grande simplicité. Seul l'étage de sortie sera éventuellement en composants discrets. La structure la plus utilisée en basses fréquences est le montage complémentaire en classe B (*figure 5.15*).

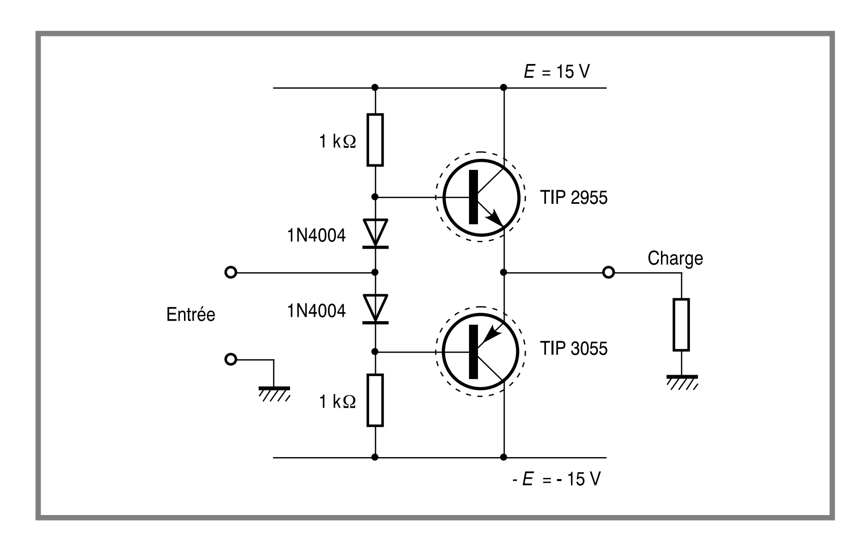


Figure 5.15 – Amplificateur de puissance en classe B.

Un transistor NPN conduit lorsque la tension d'entrée est positive tandis qu'un transistor PNP entre en action quand la tension d'entrée est négative. Les deux diodes servent à compenser le seuil de 0,6 V des transistors afin d'éviter une distorsion de la tension de sortie. Les transistors sont en général montés sur un dissipateur (aussi appelé radiateur) : c'est une plaque métallique de forme particulière (elle présente souvent des ailettes) qui permet d'améliorer l'évacuation de la chaleur vers l'extérieur.

Dans le domaine des radiofréquences, on trouve des amplificateurs sélectifs qui utilisent des circuits résonnants (bobine et condensateur). Les étages de puissance polarisés en classe C (transistor passant pendant une brève durée dans une période) avec une charge sélective permettent d'obtenir un meilleur rendement que les montages fonctionnant en classe B. Un exemple a déjà été rencontré au chapitre 3.

Les transistors sont également utilisés en commutation (*figure 5.16*).

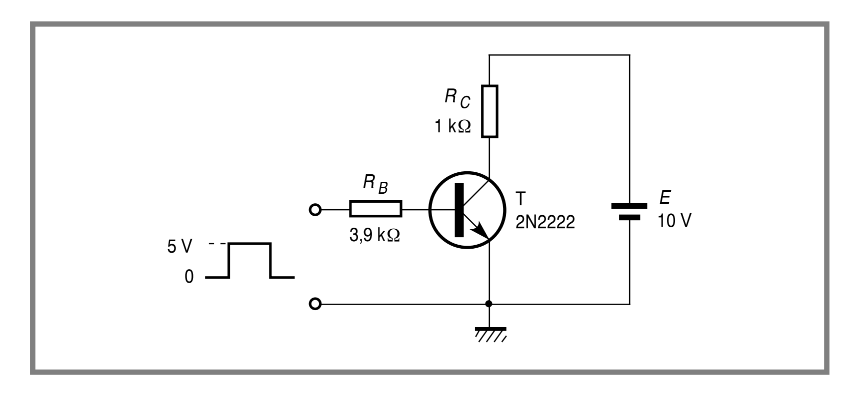


Figure 5.16 – Transistor en commutation.

La charge à alimenter est la résistance R_C. Le transistor se comporte comme un circuit ouvert lorsqu'il est bloqué et c'est pratiquement un court-circuit quand il est saturé. Il réalise ainsi un interrupteur (*figure 5.17*).

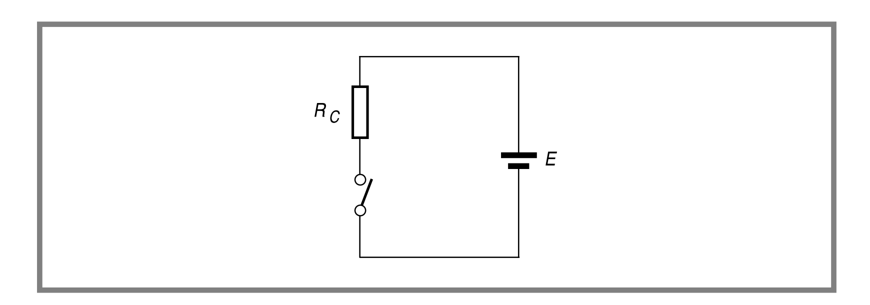


Figure 5.17 – Pour la charge, le transistor se comporte comme un interrupteur.

Pour avoir le résultat souhaité, il faut commander correctement le transistor. Pour bloquer le composant, il faut appliquer sur sa base une tension négative (ou tout au moins inférieure au seuil 0,5 à 0,6 V). Pour obtenir la saturation, il faut que la tension appliquée sur

base par l'intermédiaire de la résistance R_B soit supérieure au seuil et que le courant soit plus grand que :

$$I_{B\,min} = \frac{I_{Csat}}{\beta}$$

I_{Csat} est la valeur du courant de collecteur que l'on obtient si le transistor est bien saturé ($V_{CE} \approx 0$). Ici, on a :

$$I_{Csat} = \frac{E}{R_C}$$

La valeur minimale du courant de base donne une valeur maximale de la résistance R_B si le niveau d'entrée est fixé à V :

$$R_{B\,max} = \frac{V - V_{BE}}{I_{B\,min}} \quad \text{avec} \quad V_{BE} \approx 0{,}6 \text{ V}$$

Prenons par exemple une charge $R_C = 1$ kΩ alimentée par une tension $E = 10$ V. Les niveaux du signal de commande sont 0 et 5 V. Vérifions que le transistor fonctionne bien en commutation. À l'état bas (0) de la tension d'entrée, le transistor est bloqué. Pour l'état haut (5 V), il faut voir si le courant de base est suffisant pour assurer la saturation. Le courant de collecteur est :

$$I_{Csat} = \frac{10}{1} = 10 \text{ mA}$$

Pour le transistor 2N2222, le constructeur donne pour β une fourchette de 100 à 300. Pour que le résultat soit valable quel que soit l'échantillon utilisé, il faut se placer dans le cas le plus défavorable qui puisse être atteint. Le transistor est d'autant plus difficile à saturer que la valeur minimale de I_B est élevée, et donc que β est faible. On lit donc dans la notice du composant le minimum $\beta_{min} = 100$. On calcule alors :

$$I_{B\,min} = \frac{10}{100} = 0{,}1 \text{ mA}$$

Pour tenir compte du fait que le calcul est approché et pour obtenir une saturation franche, on choisit une marge de sécurité importante.

Il est d'usage de multiplier la valeur minimale de I_B par un nombre appelé coefficient de saturation. Sa valeur est choisie en fonction des ordres de grandeurs : on prend souvent 10 ou 20 pour les petits transistors alors qu'on se contente de 2 ou 3 pour un circuit de forte puissance. Avec un facteur 10, le courant de base vaut ici :

$$I_B = 10 \times 0{,}1 = 0{,}1 \text{ mA}$$

On en déduit la valeur de la résistance R_B :

$$R_B = \frac{5 - 0{,}6}{1} = 4{,}4 \text{ k}\Omega$$

On prend la valeur immédiatement inférieure dans la série normalisée E12, soit 3,9 kΩ.

On constate que le montage remplit deux fonctions. D'une part, il modifie les niveaux de tension (0 et 5 V pour la commande 0 et 10 V pour la charge). D'autre part, il amplifie le courant : on commande ici 10 mA par moins de 1 mA. Les transistors en commutation sont utilisés pour l'une de ces fonctions ou pour les deux simultanément. Il est important de bien respecter la condition de saturation. En effet, un transistor fonctionnant en commutation dissipe beaucoup moins de puissance qu'un élément fonctionnant en amplification. Un composant correctement dimensionné pour un fonctionnement prévu en commutation risque d'être détruit par échauffement excessif s'il est seulement conducteur au lieu d'être saturé.

Les paramètres qui limitent la rapidité des basculements sont les durées de commutation (temps de descente et de montée). Pour améliorer la rapidité, on utilise parfois un condensateur d'accélération placé en parallèle sur la résistance R_B (*figure 5.18*).

Au moment des commutations, le condensateur fournit un pic de courant qui a un effet accélérateur.

Lorsque les signaux de commande sont bipolaires (un niveau positif et un niveau négatif), il faut faire attention à respecter la valeur maximale autorisée pour la tension inverse entre base et émetteur (de l'ordre de 5 à 6 V pour les transistors courants). Lorsque le

Figure 5.18 – Condensateur d'accélération.

niveau négatif de la commande dépasse cette limite, il faut ajouter une diode pour protéger le transistor (*figure 5.19*).

Lorsque la tension d'entrée est à 10 V, la diode est bloquée et sa présence ne change rien. Par contre, lorsque la tension vaut – 10 V, la diode est passante et elle fixe la tension V_{BE} à environ – 0,6 V, ce qui permet de bloquer le transistor en respectant la tension maxi-

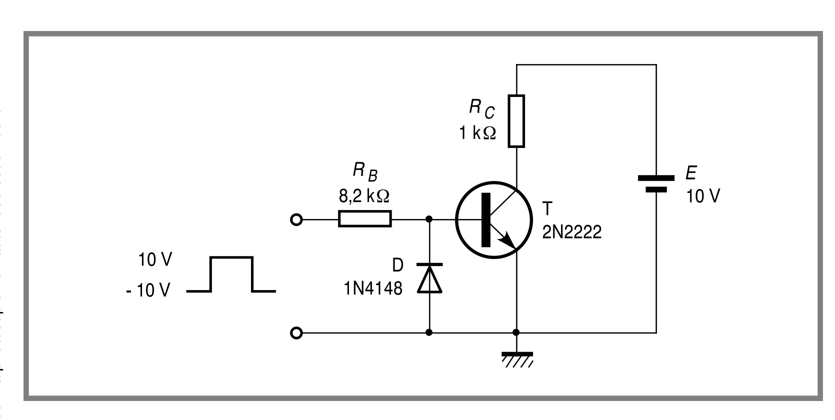


Figure 5.19 – Diode de protection.

male autorisée en inverse entre base et émetteur. D'autres configurations peuvent être rencontrées, l'élément de protection étant toujours une diode.

La charge du transistor en commutation n'est pas toujours résistive. On a déjà rencontré deux cas de charges plus complexes, mais à comportement inductif : le transformateur d'impulsions et le relais. On a vu que pour ce type de charges, il est nécessaire d'ajouter une diode de roue libre pour assurer l'évacuation de l'énergie électromagnétique au moment du blocage du transistor.

Le transistor MOS est très intéressant pour un fonctionnement en commutation. En effet, aucun courant n'est nécessaire pour commander ce composant, sauf au moment des commutations, ce qui est un avantage certain par rapport au transistor bipolaire, en particulier pour des charges qui consomment un courant important. Prenons l'exemple de la *figure 5.20*.

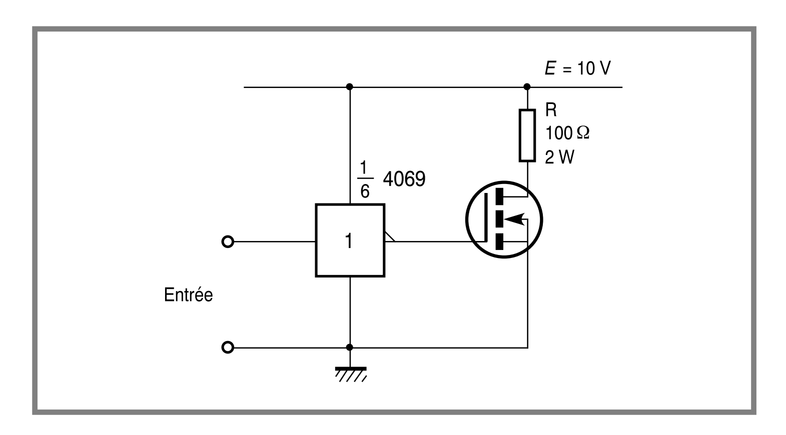


Figure 5.20 – Transistor MOS associé à un circuit CMOS.

Il s'agit de commander une charge de 100 Ω branchée sous 10 V à l'aide d'un circuit logique CMOS. Le courant nécessaire de 100 mA ne peut pas être fourni par le circuit intégré. On utilise un

transistor MOS canal N. Le branchement est très simple : il suffit de relier la grille du transistor à la sortie de l'inverseur. Lorsque cette sortie est à l'état bas (0), le transistor MOS est bloqué tandis que quand la sortie est à l'état haut (10 V), le transistor est conducteur et se comporte entre drain et source comme une faible résistance. Le circuit intégré ne fournit aucun courant pendant les états stables. Seul un pic de courant est nécessaire à chaque commutation. Ici, l'alimentation est commune au circuit logique et au transistor, mais on peut aussi employer des alimentations séparées.

Beaucoup d'autres fonctions peuvent être réalisées avec des transistors. On a par exemple rencontré un oscillateur Colpitts au chapitre 3. Il s'agit d'un montage fournissant une tension sinusoïdale de haute fréquence. Dans ce domaine, on utilise des condensateurs et des bobines pour réaliser le filtre et un transistor pour l'amplificateur. Par contre, aux basses fréquences, les oscillateurs sont différents. On n'emploie plus de bobinages qui sont alors encombrants : les filtres sont composés de résistances et de condensateurs. L'élément actif est alors rarement un transistor car l'amplificateur opérationnel est beaucoup plus simple à utiliser, la limite principale de ce composant étant sa relative lenteur.

CHAPITRE 6

THYRISTORS ET TRIACS

Le thyristor et le triac sont des composants qui permettent de commander des puissances relativement importantes avec peu de pertes car ils ne fonctionnent qu'en commutation. Ce sont plus spécifiquement des composants de l'électronique de puissance, mais on les trouve aussi en électronique de faible puissance pour quelques applications spécifiques.

6.1 Principe et propriétés

Thyristors

Le thyristor est apparu en 1957. Le mot a été formé à partir de *thyratron* (triode à gaz qui jouait autrefois un rôle analogue) et de *transistor*. C'est un redresseur commandé au silicium comme l'indique son appellation anglo-saxonne SCR (*Silicon controlled rectifier*).

Constitution

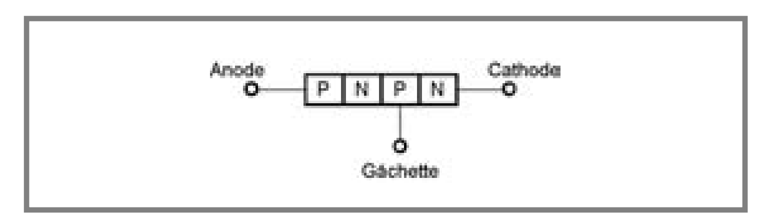


Figure 6.1 – Constitution de principe d'un thyristor.

Le thyristor est formé d'un matériau semi-conducteur sur lequel on a créé trois jonctions : il y a ainsi deux zones N et deux zones P (*figure 6.1*). Trois bornes sont accessibles : l'anode (A), la cathode (K) et la gâchette (G).

Symbole

On représente le thyristor par son symbole normalisé (*figure 6.2*) ou par une de ses variantes (*figure 6.3*).

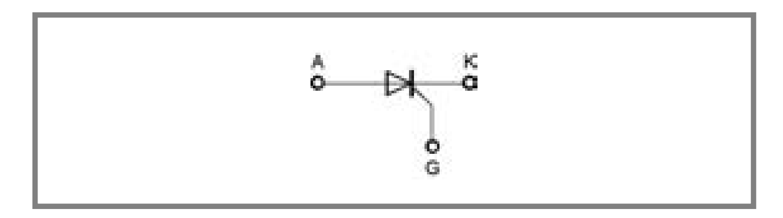


Figure 6.2 – Symbole normalisé d'un thyristor.

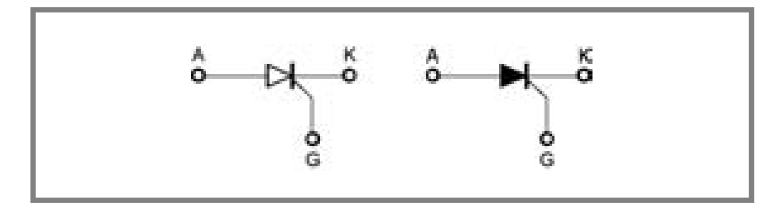


Figure 6.3 – Variantes du symbole d'un thyristor.

Principe

Le thyristor se comporte comme une diode dont on commande la mise en conduction. Le symbole du thyristor ressemble d'ailleurs beaucoup à celui d'une diode. On y retrouve l'anode et la cathode, mais une troisième borne apparaît, la gâchette. C'est elle qui permet la commande du composant. Pour que le thyristor devienne passant, il faut non seulement le polariser en direct comme une diode, mais

aussi lui appliquer un courant adéquat entrant dans la gâchette. Une fois le thyristor amorcé (c'est-à-dire devenu passant), il est inutile de maintenir la présence du courant de gâchette. C'est la raison pour laquelle, la plupart du temps, la commande se fait par une impulsion de courant. Cette dernière doit néanmoins respecter certaines conditions : minimum de hauteur, minimum de durée. Le blocage se fait comme celui d'une diode, il n'est pas commandé par la gâchette.

Triacs

Le triac (*triode alternating current*) est apparu en 1964. C'est un composant devenant passant pour les deux alternances d'un courant alternatif, avec une seule électrode de commande.

Constitution

Dans le principe, un triac est en quelque sorte un assemblage de deux thyristors (*figure 6.4*). Trois bornes sont accessibles : deux bornes principales B_1 et B_2 (appelées souvent MT_1 et MT_2 par les Anglo-saxons, MT pour *Main terminal*) et la gâchette (G).

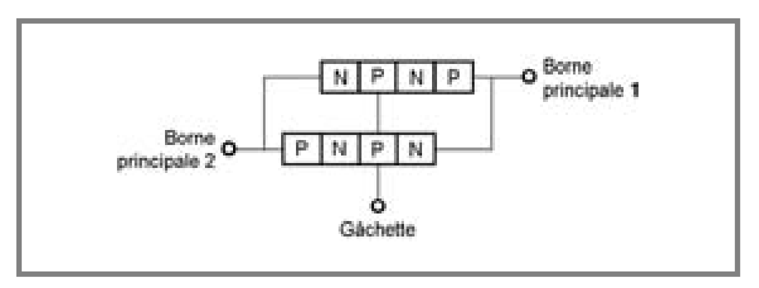


Figure 6.4 – Constitution de principe d'un triac.

Symbole

On représente le triac par son symbole normalisé (*figure 6.5*) ou par une variante (*figure 6.6*).

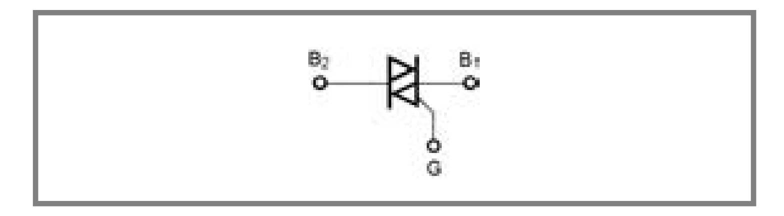


Figure 6.5 – Symbole normalisé d'un triac.

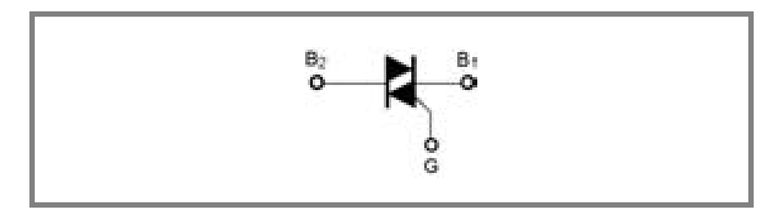


Figure 6.6 – Variante du symbole d'un triac.

Principe

Un triac se comporte de manière approximative comme une association de deux thyristors montés en parallèle en sens contraire (tête-bêche), mais avec gâchette commune. C'est donc un composant bidirectionnel : le courant peut le traverser indifféremment dans un sens ou l'autre.

Pour déclencher un triac, le sens du courant de gâchette n'est pas obligatoirement imposé : il y a quatre possibilités différentes, mais seules deux d'entre elles sont utilisées en pratique (*figure 6.7*).

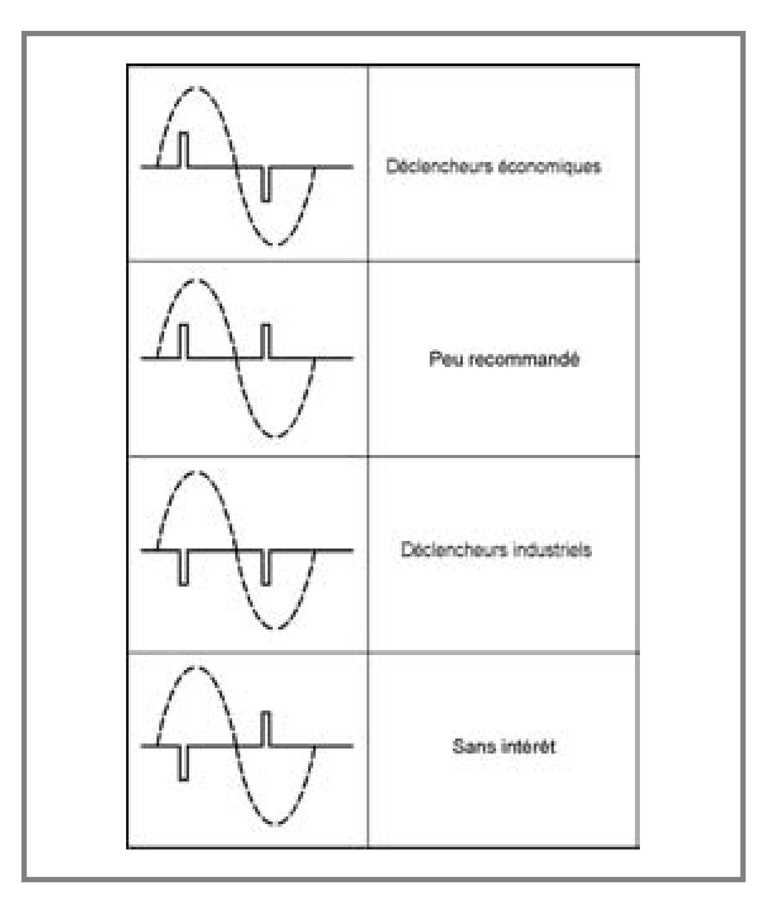


Figure 6.7 – Diverses possibilités pour l'amorçage d'un triac : courant entrant dans la gâchette (en trait plein) par rapport au courant principal de B_2 vers B_1 (en tirets).

6.2 Caractéristiques technologiques

Critères de choix

Les principaux critères de choix d'un thyristor ou d'un triac sont tout d'abord ses limites absolues, principalement la tension maximale à l'état bloqué et le courant maximal à l'état passant. Le courant de gâchette minimal pour assurer l'amorçage à coup sûr est aussi à considérer.

Boîtiers

Les petits thyristors ou triacs sont disponibles dans des boîtiers identiques à ceux des transistors.

6.3 Domaines d'utilisation

Avertissement important

Certains des dispositifs décrits sont directement branchés sur le réseau 230 V. De ce fait, le montage entier se trouve relié à la prise de courant. Pour expérimenter de tels circuits, il est absolument indispensable de prendre toutes les précautions nécessaires du fait des tensions élevées et dangereuses qui sont ainsi présentes entre certains points du montage et, surtout, entre le montage entier et la terre.

Montages à thyristors

Le thyristor peut servir d'interrupteur commandé à la fermeture dans des circuits fonctionnant en continu avec des tensions élevées. C'est souvent le cas pour décharger un condensateur. Deux exemples classiques : le déclenchement d'un flash électronique et le circuit d'allumage électronique d'une voiture.

L'application courante du thyristor en électronique de puissance est le redressement commandé. Pour un redresseur monophasé, il suffit de remplacer la diode par un thyristor muni de son circuit de

déclenchement synchronisé sur la source de tension alternative (*figure 6.8*). La tension aux bornes de la charge est alors découpée (*figure 6.9*) et sa valeur moyenne peut être réglée en jouant sur le retard à l'amorçage du thyristor.

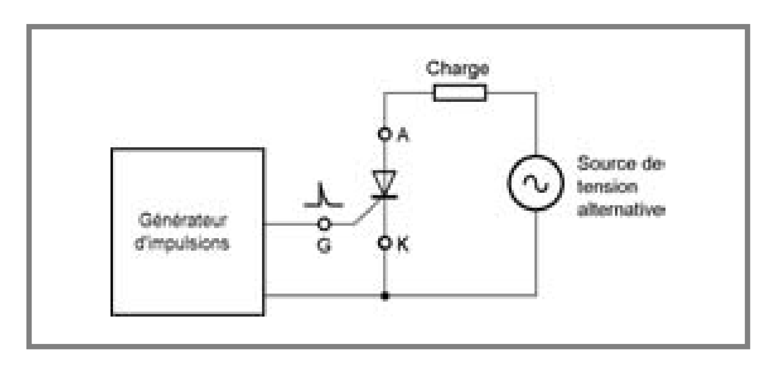


Figure 6.8 – Redresseur commandé.

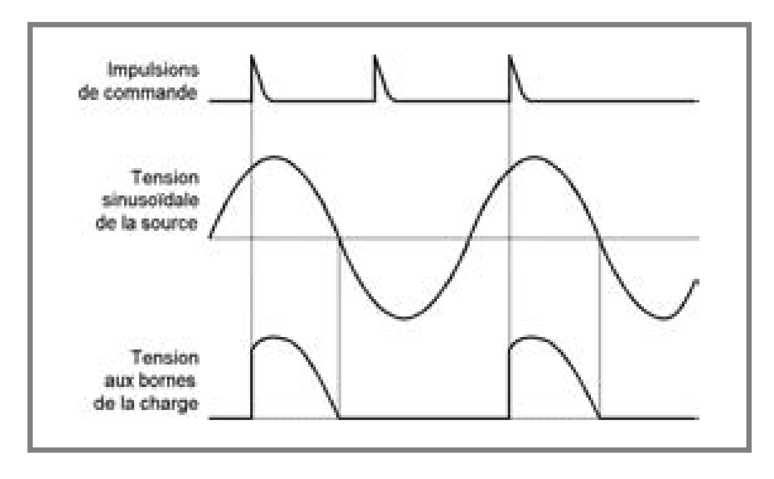


Figure 6.9 – Allure des tensions dans un redresseur commandé.

Montages à triacs

L'application classique du triac est le gradateur ou variateur qui permet de régler la puissance fournie à une charge : lampe, petit moteur. Le circuit le plus simple est celui du variateur de lumière (*figure 6.10*) : il permet de modifier l'intensité lumineuse d'une

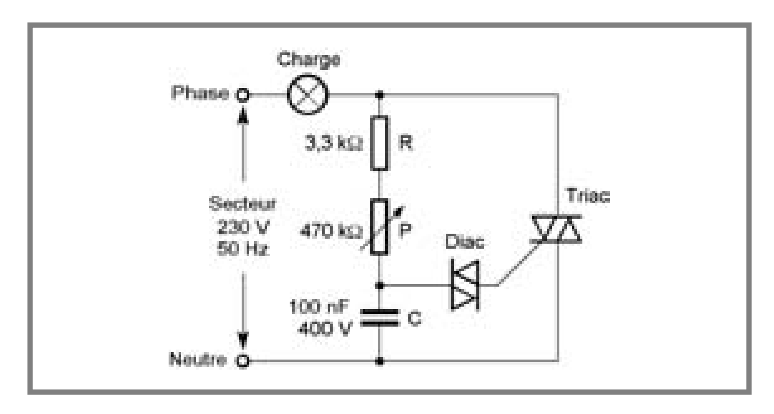


Figure 6.10 – Variateur de lumière.

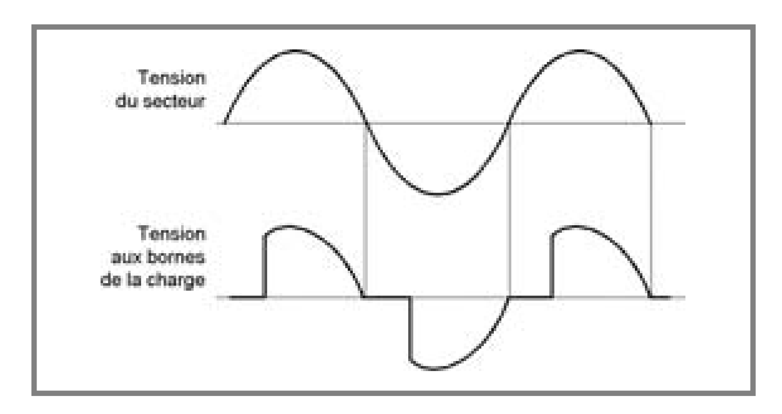


Figure 6.11 – Allure des tensions dans un variateur à triac.

lampe par action sur le potentiomètre. La tension aux bornes de la lampe est découpée (*figure 6.11*) et sa valeur efficace peut être réglée en agissant sur le retard à l'amorçage du triac. Le montage fait apparaître un composant particulier, le diac, dont c'est d'ailleurs l'unique usage. Le condensateur se charge et lorsque la tension est suffisante, le diac laisse passer brutalement le courant et amorce le triac. L'impulsion obtenue a même polarité que la tension du secteur.

Ce circuit élémentaire (mais économique) a des performances médiocres et son fonctionnement est incertain sur charge inductive. Il existe, pour le remplacer avantageusement, un certain nombre de circuits intégrés spécialisés. Un exemple très répandu est le TCA 785 de *Infineon* (*figure 6.12*).

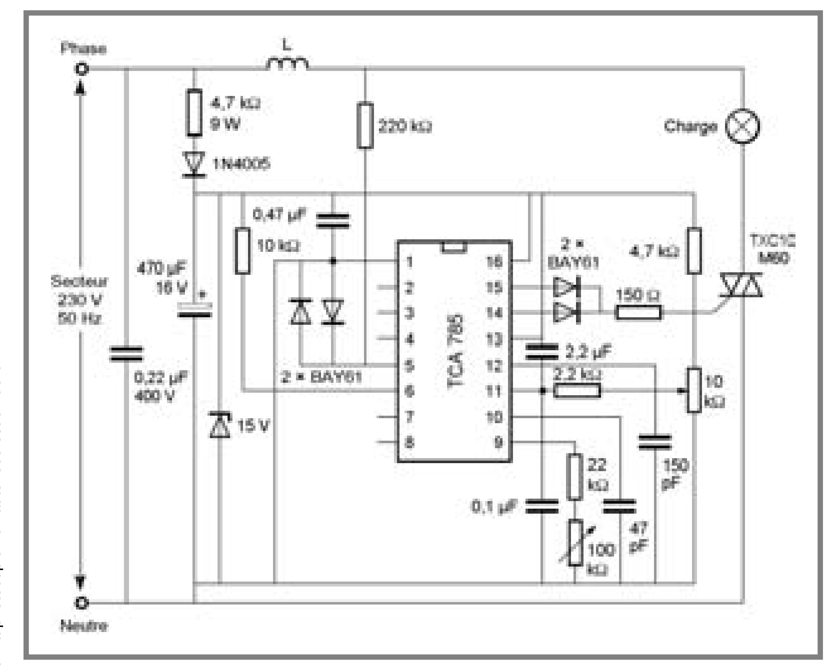


Figure 6.12 – Gradateur à triac commandé par un circuit intégré TCA 785.

Ces dispositifs où le réglage se fait par l'intermédiaire du retard à l'amorçage du triac sont appelés « à commande de phase ». Ils présentent l'inconvénient de générer des parasites importants à cause des fronts raides qui apparaissent sur la tension. On entend parfois ces signaux gênants sur un récepteur radio placé à proximité d'un variateur comme celui d'un moteur de perceuse.

Il est possible d'éviter de créer des parasites en effectuant les commutations lorsque la tension est nulle. Pour les charges présentant une forte inertie, comme les résistances de chauffage, il n'est pas nécessaire de découper la tension à chaque période du secteur. Il est alors préférable de laisser passer plusieurs périodes du secteur, puis de bloquer plusieurs autres périodes : la commande est appelée « par ondes entières ». La tension aux bornes de la charge est constituée de rafales de sinusoïdes (*figure 6.13*). La puissance est réglée par l'importance relative des deux phases.

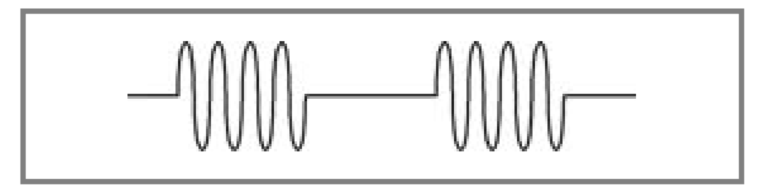


Figure 6.13 – Tension obtenue avec une commande par ondes entières.

La commande est habituellement assurée par un circuit intégré spécialisé. Par exemple, le circuit CA3059 permet de réaliser facilement la régulation d'un four électrique (*figure 6.14*). La température est détectée à l'aide d'une thermistance CTN (coefficient de température négatif) : c'est un composant dont la résistance diminue quand la température augmente, selon une loi de variation déterminée.

Nous avons signalé plus haut le danger que présente le fait d'avoir un circuit relié directement au secteur. Une solution intéressante pour assurer l'isolement de la commande par rapport au secteur est l'optocoupleur. C'est l'association, dans un boîtier opaque d'une diode émettrice d'infrarouge et d'un composant sensible au rayon-

Figure 6.14 – Commande de résistance chauffante par un circuit intégré CA3059.

nement. Ce dernier peut être un optotriac. On peut ainsi commuter une charge branchée sur le secteur avec un isolement total (*figure 6.15*). Lorsque l'interrupteur K est fermé, la lampe est allumée tandis que lorsque K est ouvert, la lampe est éteinte.

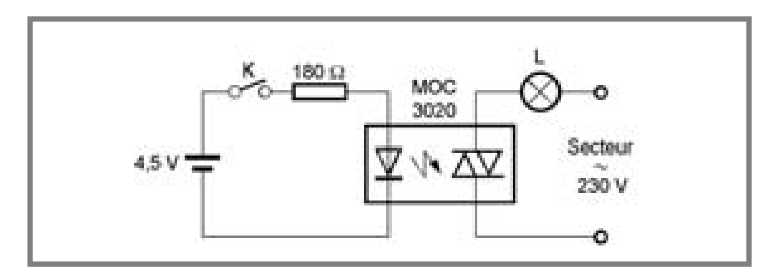


Figure 6.15 – Commande d'une lampe branchée sur le secteur par optocoupleur.

CHAPITRE 7

CIRCUITS INTÉGRÉS ANALOGIQUES

On se propose dans ce chapitre d'étudier les caractéristiques et les applications des circuits intégrés analogiques les plus courants.

7.1 Généralités

Un circuit intégré contient un grand nombre de composants placés sur la même pastille de silicium (une « puce »). En général, l'utilisateur n'a pas besoin de connaître le schéma interne du circuit, mais doit seulement tenir compte de quelques caractéristiques externes. La conception d'un montage à circuits intégrés est souvent beaucoup plus facile que celle d'un montage à composants discrets. De plus, la mise au point est nettement plus réduite et le dépannage est simplifié car, dans de nombreux cas, seules les valeurs de quelques composants passifs (résistances et condensateurs) fixent les caractéristiques du montage.

Dans les circuits analogiques, les informations sont portées par les valeurs instantanées des tensions et des courants. La façon de raisonner est différente de celle qui est employée pour les circuits logiques qui seront étudiés au chapitre suivant.

Les circuits intégrés peuvent être présentés dans différents types de boîtiers. Pour les applications professionnelles, on rencontre des boîtiers céramique ou parfois des boîtiers métalliques ronds qui ressemblent à ceux qui sont utilisés pour les transistors. Cependant, de nombreux circuits intégrés courants sont présentés dans des boîtiers en plastique. Les connections externes sont disposées en deux

rangées de chaque côté du boîtier. C'est pour cela que l'on désigne souvent ces modèles par DIL (*dual in line*). Les types les plus répandus ont 8 ou 14 broches (que l'on appelle familièrement « pattes »). Les représentations des circuits intégrés sont toujours en vue de dessus, contrairement à la convention utilisée pour les transistors. Le sens dans lequel il faut placer le composant est indiqué par un point en relief ou une encoche (*figure 7.1*).

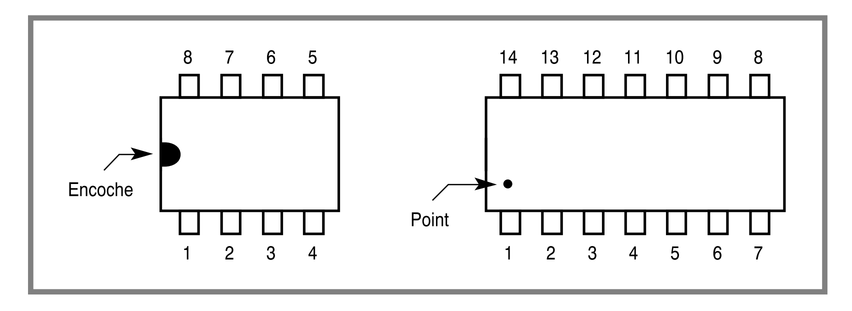


Figure 7.1 – Numérotation pour un boîtier DIL 8 ou 14 broches.

La numérotation de bornes est toujours celle qui est donnée sur la figure. Les notices des constructeurs précisent sur un dessin (ou parfois avec les numéros) les rôles respectifs des différentes connexions : c'est le brochage du circuit.

Les composants les plus courants sont fabriqués par presque tous les constructeurs. Par contre, certains circuits plus particuliers ne se trouvent que dans le catalogue d'un constructeur (ou plutôt de deux pour assurer une « seconde source »). On peut connaître le fabricant d'un circuit intégré soit par certains symboles graphiques qui sont parfois dessinés sur les boîtiers, soit par la référence du composant. Chaque constructeur emploie son propre système pour numéroter ses différents produits. Cependant, un certain nombre de conventions se retrouvent partout. Une référence est en général composée d'un groupe de lettres qui indique le genre de circuit chez un fabricant donné, d'un numéro qui désigne le composant et d'une ou plusieurs

lettres qui indiquent la gamme de température et le boîtier. Par exemple, un circuit est numéroté LM741CN. Le préfixe indique qu'il s'agit d'un circuit analogique du constructeur *National Semiconductor,* 741 est le numéro qui correspond à un amplificateur opérationnel, C précise que la gamme de température est 0-70 °C et N indique que le composant est en boîtier DIL. Le préfixe n'est pas une indication formelle du constructeur car certains conservent celui qui correspond au concepteur à l'origine du composant. Quelques préfixes correspondant à des circuits intégrés analogiques sont donnés dans le *tableau 7.1.*

Tableau 7.1 – Préfixes utilisés par différents constructeurs.

Préfixe	Constructeur
AD, OP	Analog Devices
CA, HA, ICL	Intersil
KA, KF, RC	Fairchild
L, TDA	STMicroelectronics
LF, LM	National Semiconductor
LT, LTC	Linear Technology
MAX	Maxim
MC	Motorola
NE	Philips Semiconductors
TL, TLC	Texas Instruments

Les gammes de température possibles sont : la gamme commerciale (0, 70 °C), la gamme industrielle (– 25 °C, 85 °C) et la gamme militaire (– 55 °C, 125 °C). Tous les composants ne sont pas disponibles

dans toutes les gammes de température. Certains constructeurs n'utilisent pas un suffixe pour indiquer la gamme de température, mais modifient le préfixe ou le numéro. L'indication de la nature du boîtier par la dernière lettre du suffixe dépend également du constructeur. Dans la pratique, on désigne les circuits courants par leur simple numéro. Un 741 peut être choisi chez n'importe quel fabricant, ses performances seront identiques bien que la référence exacte puisse être différente : KA741, MC1741 ou LM741 correspondent au même circuit intégré. Sans précision supplémentaire, la gamme de température est commerciale et le boîtier est DIL en plastique.

7.2 Amplificateur opérationnel

C'est de loin le circuit intégré analogique le plus répandu. Son emploi est particulièrement simple et son coût est minime. C'est un circuit pratiquement universel que l'on peut utiliser dans de nombreuses applications en remplacement de montages à plusieurs transistors.

On le représente par son symbole normalisé (*figure 7.2*) ou par un ancien schéma encore souvent utilisé (*figure 7.3*).

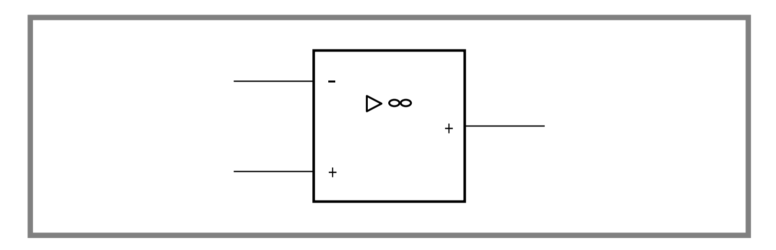


Figure 7.2 – Symbole normalisé d'un amplificateur opérationnel.

Le composant possède deux entrées notées + et – et une sortie. Pour fonctionner, le circuit intégré doit être alimenté, c'est-à-dire relié à

un ou deux générateurs de tension continue afin de polariser correctement les composants internes et de fournir l'énergie nécessaire. Le plus souvent, l'amplificateur opérationnel est employé avec une alimentation double symétrique (*figure 7.4*).

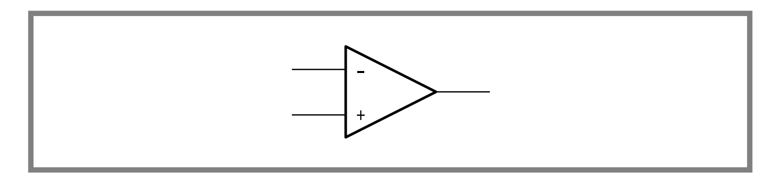


Figure 7.3 – Symbole courant d'un amplificateur opérationnel.

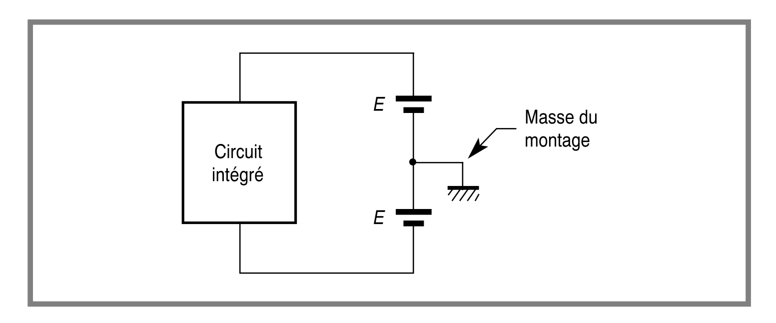


Figure 7.4 – Alimentation d'un amplificateur opérationnel.

Sur certains modèles, il existe des bornes prévues pour la compensation du décalage : on y connecte un potentiomètre qui sera réglé pour annuler la tension de sortie lorsque l'entrée est court-circuitée. Le branchement pour un amplificateur opérationnel du type 741 a été indiqué au chapitre 1. Ce potentiomètre n'est pas toujours nécessaire et les bornes correspondantes peuvent être laissées en l'air si l'on n'utilise pas ce réglage.

Les courants dans les entrées du circuit sont très faibles. On admet pour les calculs qu'ils sont nuls :

$$i_+ = i_- = 0$$

L'amplificateur opérationnel peut aussi bien fonctionner en régime linéaire (amplificateurs, filtres…) qu'en régime de commutation (comparateurs, triggers, astables…). Pour obtenir un régime linéaire, il faut que le montage possède une contre-réaction, c'est-à-dire une liaison entre la sortie et l'entrée – de l'amplificateur opérationnel.

Le fonctionnement est par contre en commutation si le montage possède une réaction positive, c'est-à-dire une liaison entre la sortie et l'entrée + de l'amplificateur opérationnel ou si le composant est en boucle ouverte (ni réaction ni contre-réaction).

Pour le régime linéaire, les tensions présentes sur les deux entrées de l'amplificateur opérationnel sont pratiquement égales et on écrit pour les calculs :

$$v_+ = v_-$$

En commutation, la tension de sortie ne peut prendre que deux valeurs sensiblement symétriques, $-U$ et U, qui sont les tensions de saturation. La valeur de U est légèrement inférieure à la tension d'alimentation du circuit intégré, on peut par exemple obtenir $U = 14$ V pour une alimentation de 15 V. La sortie est au niveau haut (U) si v_+ est supérieur à v_- et au niveau bas dans le cas contraire.

On réalise facilement un amplificateur de tension avec un amplificateur opérationnel et deux résistances (*figure 7.5*).

L'entrée se fait directement sur la borne + de l'amplificateur opérationnel :

$$v_+ = v_E$$

Les résistances R_1 et R_2 forment un diviseur de tension alimenté par la sortie de l'amplificateur opérationnel. Ce diviseur n'est pas chargé puisque $i_- = 0$ et on peut écrire :

$$v_- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_S$$

Comme le montage est en fonctionnement linéaire grâce à la contre-réaction effectuée par R_2, on a :

$$v_E = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_S$$

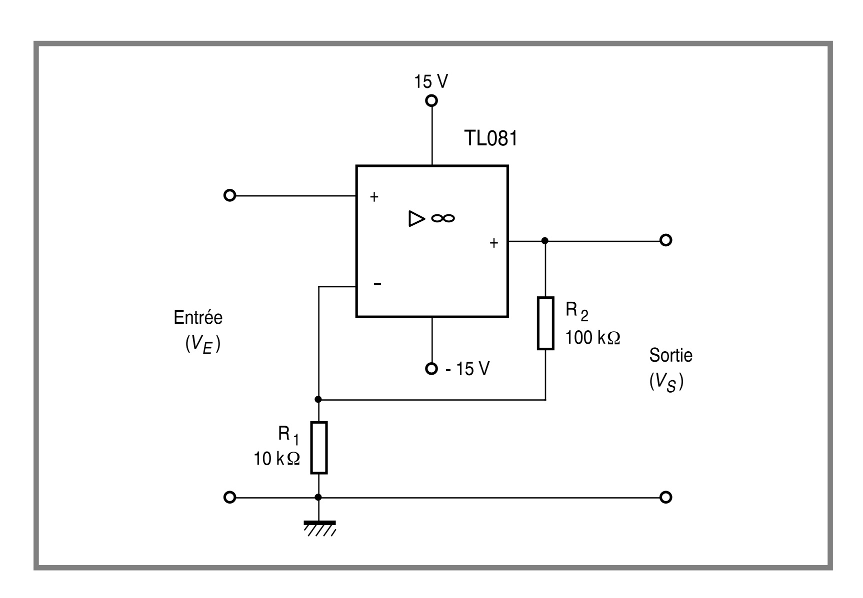


Figure 7.5 – Amplificateur de tension.

soit :

$$v_S = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_E$$

L'amplification du montage est donc :

$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Avec les valeurs numériques du schéma, on obtient :

$$A = 1 + \frac{100}{10} = 11$$

Ainsi, si l'on applique à l'entrée du montage une tension sinusoïdale, on trouve à la sortie un signal de même forme, mais d'amplitude 11 fois plus grande (*figure 7.6*).

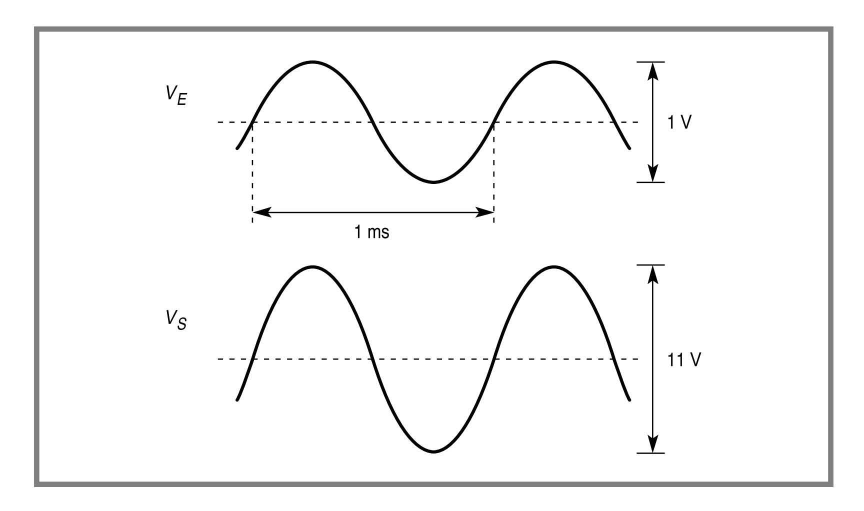


Figure 7.6 – Allure de la tension de sortie de l'amplificateur pour une entrée sinusoïdale d'amplitude 0,5 V et de fréquence 1 kHz.

Le schéma d'une bascule à hystérésis (ou trigger de Schmitt) ressemble beaucoup à celui d'un amplificateur. La seule différence avec le circuit précédent est que les bornes + et – de l'amplificateur opérationnel ont été inversées (*figure 7.7*).

En fait, cela change tout au fonctionnement du montage car la réaction effectuée par la résistance R_2 entraîne un régime de commutation. La sortie ne peut prendre que les valeurs $-U$ et U. La tension sur l'entrée + ne peut donc être égale qu'aux valeurs :

$$-V_0 = -\frac{R_1}{R_1 + R_2}U \quad \text{et} \quad V_0 = \frac{R_1}{R_1 + R_2}U$$

La tension de sortie passe d'un niveau à l'autre lorsque $v_E = v_-$ atteint la valeur de v_+. Les seuils de basculement sont donc différents selon que la sortie est à l'état haut ou bas : ce sont les tensions $-V_0$ et V_0 (*figure 7.8*).

Ce phénomène est appelé hystérésis. Avec les valeurs numériques du schéma, les seuils valent :

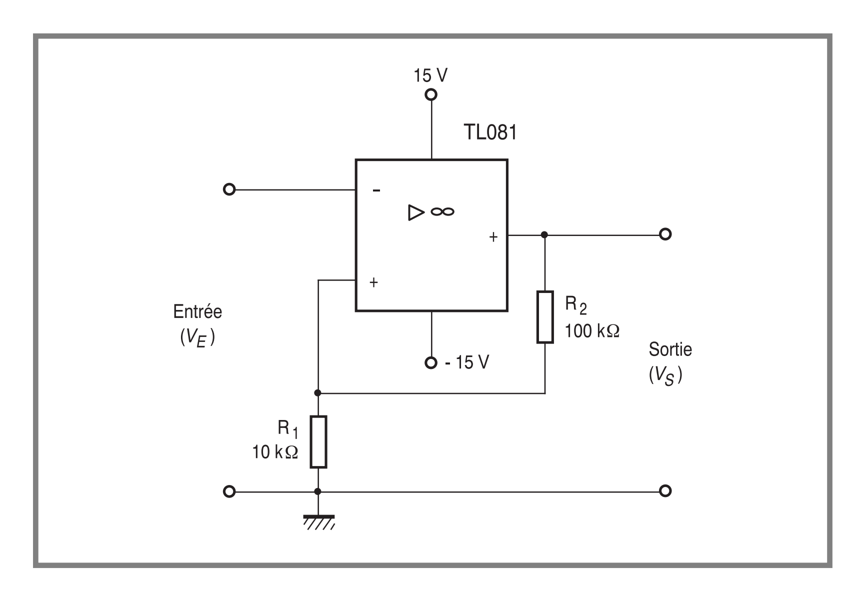


Figure 7.7 – Bascule à hystérésis.

$$\pm V_0 = \pm \frac{10}{10 + 100} \times 14 = \pm 1{,}27 \text{ V}$$

Avec un amplificateur opérationnel en boucle ouverte, on réalise un détecteur de passage à zéro (*figure 7.9*).

Le fonctionnement est en commutation et la sortie ne peut prendre que les valeurs – U et U. L'entrée – étant à la masse, les basculements se produisent lorsque la tension d'entrée v_e, appliquée directement sur l'entrée +, passe par 0 (*figure 7.10*).

Ce montage est un cas particulier du comparateur dont une réalisation plus élaborée a été vue au chapitre 4.

Les trois exemples qui viennent d'être étudiés illustrent les différents types de fonctionnement d'un amplificateur opérationnel. Les applications de ce composant sont très nombreuses et le sujet n'a été ici qu'effleuré.

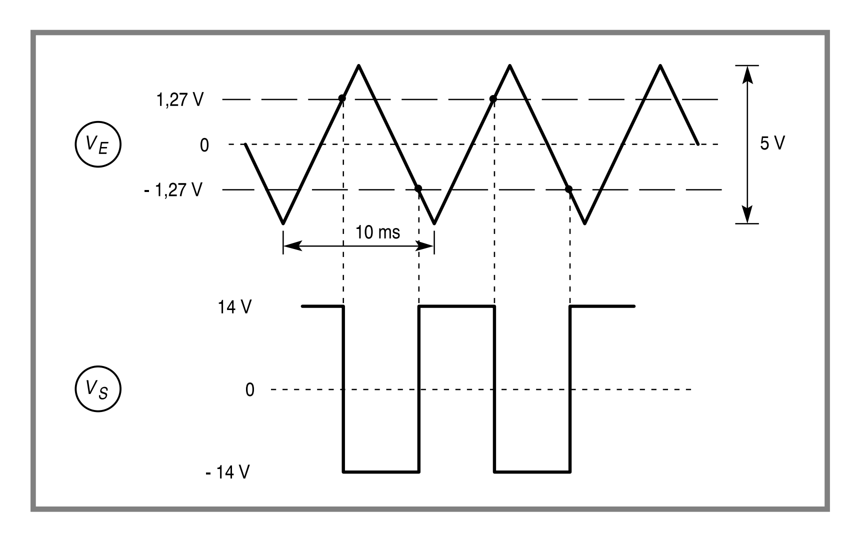


Figure 7.8 – Allure de la tension de sortie de la bascule à hystérésis pour une entrée triangulaire d'amplitude 2,5 V et de fréquence 100 Hz.

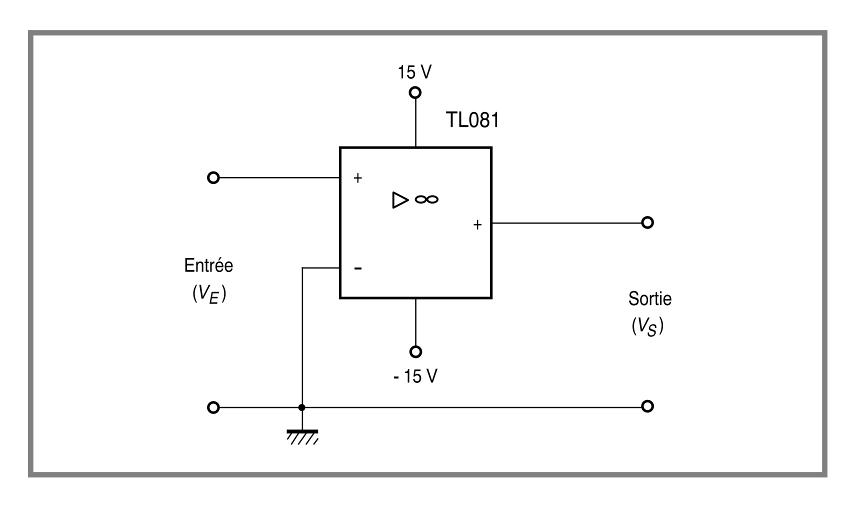


Figure 7.9 – Détecteur de passage à zéro.

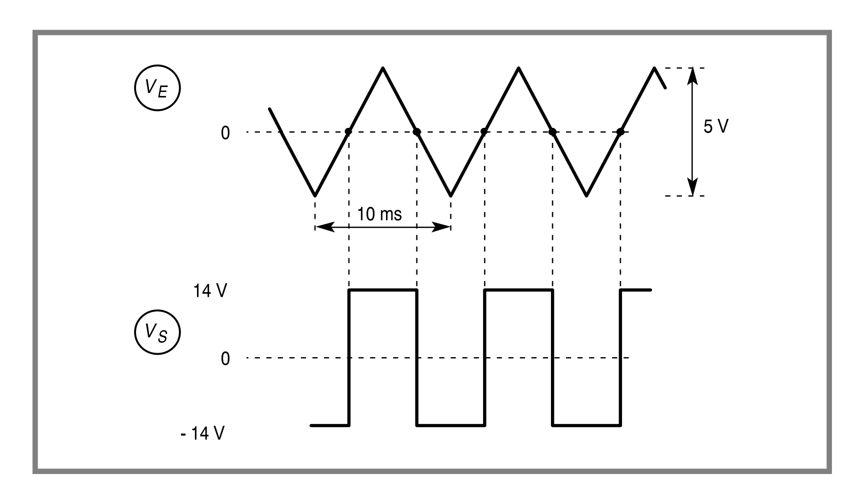


Figure 7.10 – Allure de la tension de sortie du détecteur de passage à zéro pour une entrée triangulaire d'amplitude 2,5 V et de fréquence 100 Hz.

7.3 Régulateur de tension

Ce circuit intégré, plus spécialisé que le précédent est néanmoins très répandu puisqu'il est utilisé dans la plupart des alimentations électroniques. Son emploi est en effet très simple et son coût est minime.

Le principe d'une alimentation continue stabilisée a été vu précédemment : isolement et abaissement de la tension par transformateur, redressement par diodes, filtrage par condensateur et stabilisation par diode Zener. Cette réalisation ne peut cependant fournir qu'un courant relativement faible. Dès que le débit excède quelques dizaines de milliampères, on fait appel à un régulateur intégré en remplacement du stabilisateur à diode Zener. On obtient ainsi une tension continue bien stable pour une large plage de courant de sortie. Les modèles de régulateurs les plus connus forment la série 78XX (XX indique la valeur de la tension de sortie). Ces

composants peuvent fournir plus d'un ampère. Ils se présentent en boîtier plastique TO-220 et seront éventuellement munis d'un dissipateur thermique pour les débits élevés. On trouve couramment toutes les valeurs de tensions habituellement utilisées 5, 9, 12, 15 V… Le circuit ne comporte que trois bornes : l'entrée, la sortie et la masse. Prenons comme exemple une alimentation régulée de 9 V qui utilise un régulateur intégré 7809 (*figure 7.11*).

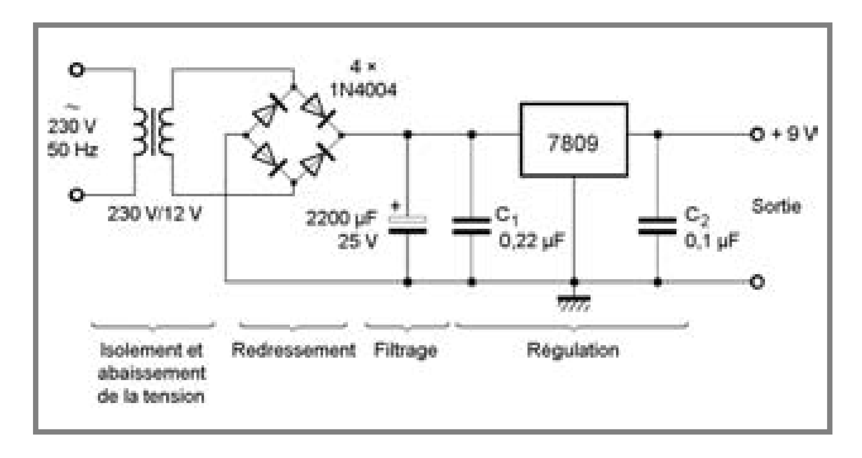


Figure 7.11 – Alimentation régulée 9 V.

Les condensateurs C_1 et C_2 ne sont pas indispensables : C_1 n'est nécessaire que si le circuit intégré se trouve à une distance appréciable du condensateur de filtrage et C_2 améliore la réponse transitoire du circuit.

Il existe également des régulateurs pour tensions négatives comme la série 79XX. Leur branchement est similaire, mais dans ce cas, le condensateur C_2 est indispensable pour la stabilité du système. La valeur de capacité est précisée par le constructeur : 1 µF. L'association d'un régulateur positif et d'un régulateur négatif permet de réaliser une alimentation double très utile pour la polarisation d'un grand nombre de circuits intégrés analogiques (*figure 7.12*).

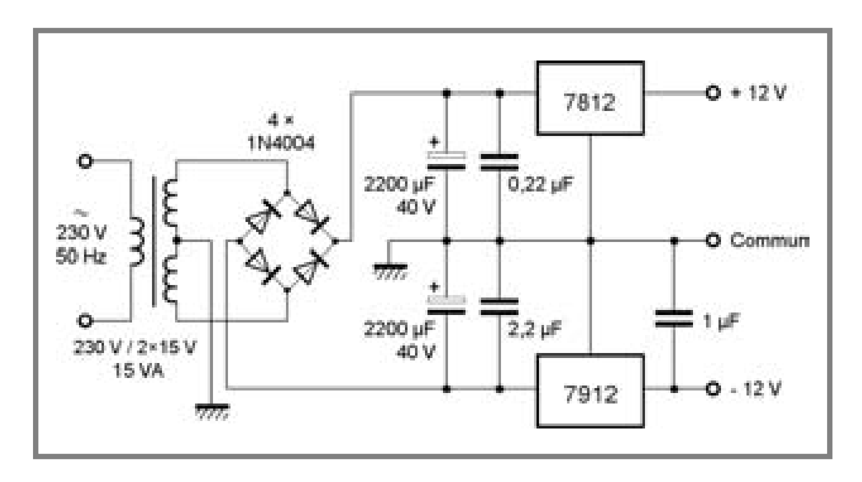


Figure 7.12 – Alimentation double ± 12 V.

7.4 Convertisseur à découpage

Si l'on dispose d'une première alimentation continue et que l'on désire obtenir une tension de valeur différente, plusieurs solutions existent.

Si la tension désirée est inférieure à la tension déjà disponible, il suffit de faire chuter les potentiels dans une simple résistance. Cette solution élémentaire ne peut toutefois donner satisfaction que si le débit est constant et le résultat obtenu sera peu précis et peu stable. On peut résoudre ce problème en employant un régulateur intégré. Toutefois, le rendement de la conversion est mauvais car la chute de tension entraîne une perte de puissance importante.

Si la tension désirée est plus élevée que celle qui est disponible ou si sa polarité est opposée, les choses se compliquent et aucune solution simple n'existait jusqu'à un passé récent. Depuis quelques années, on a vu apparaître des convertisseurs à découpage qui permettent de résoudre facilement tous ces problèmes. Un circuit intégré, associé à

quelques éléments passifs (une bobine et quelques condensateurs et résistances), suffit pour réaliser un abaissement ou une élévation de tension, ou encore un changement de polarité. De plus, ces conversions se font avec un bon rendement.
Les notices des circuits intégrés fournissent les formules qui permettent le choix des différents composants externes.
Un exemple de montage élévateur de tension a été présenté au chapitre 3. On peut donner ici un montage inverseur utilisant un circuit intégré TL497 de *Texas Instruments* (*figure 7.13*).

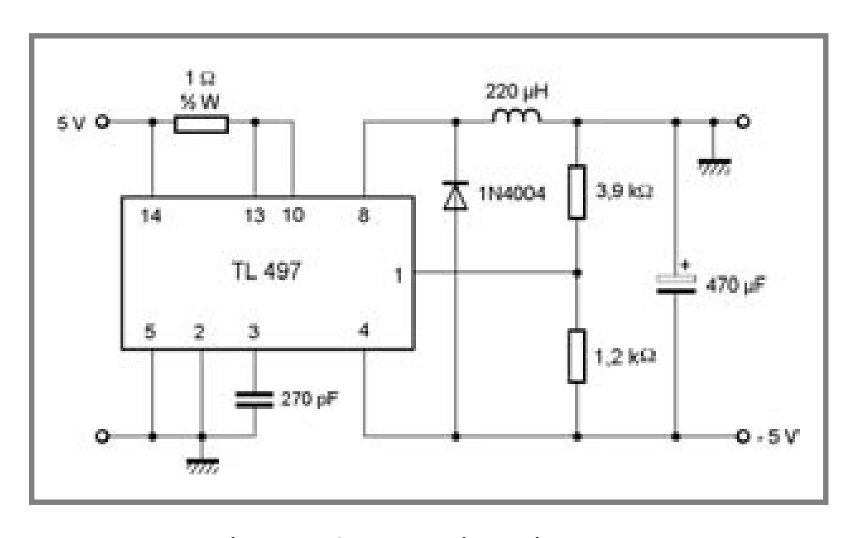


Figure 7.13 – Convertisseur inverseur.

Le circuit fournit une tension négative – 5 V à partir d'une tension positive 5 V. Le débit maximal est de 100 mA et l'ondulation crête-à-crête de la tension de sortie ne dépasse pas 1 % (à condition de prendre pour C un condensateur adapté, c'est-à-dire un modèle à faible résistance série).

7.5 Temporisateur

Un circuit intégré très classique est le temporisateur (*timer*) 555. Il a déjà été cité pour la réalisation d'un circuit astable au chapitre 2. Son rôle premier est la temporisation, c'est-à-dire la fonction réalisée par un circuit monostable (*figure 7.14*).

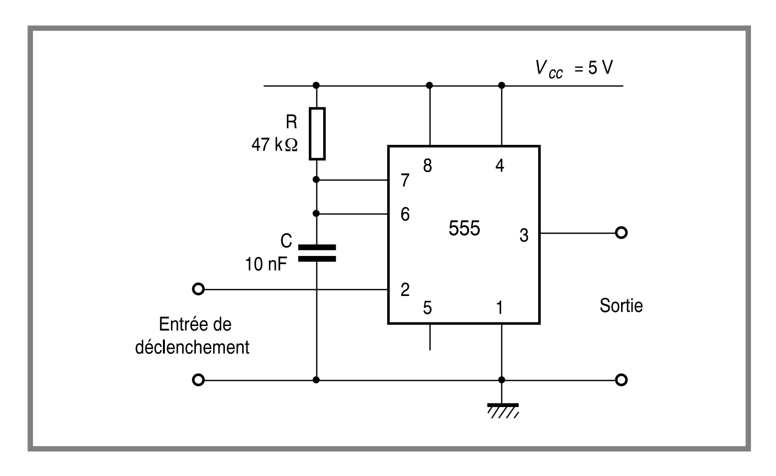


Figure 7.14 – Circuit monostable (les numéros correspondent au boîtier DIL 8 broches).

À la différence de l'astable qui ne possède aucun état stable en sortie (c'est un générateur de signaux carrés), le monostable possède un état stable et un état instable. En l'absence d'action sur l'entrée, la sortie reste dans un état donné. Lorsque l'on envoie une impulsion au circuit, la tension passe à un autre niveau pendant un temps déterminé : c'est la durée du monostable (*figure 7.15*).
La durée de la temporisation est donnée par la formule :

$$d = 1{,}1\,RC$$

Avec les valeurs du schéma, on calcule :

$$d = 0{,}5 \text{ ms}$$

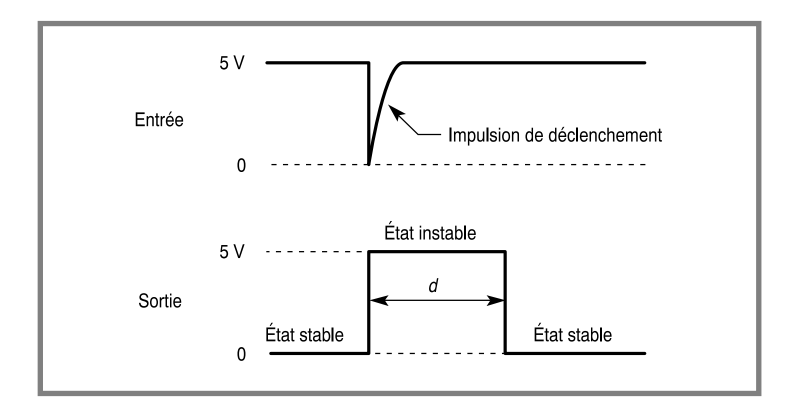


Figure 7.15 – Évolution des tensions après le déclenchement du monostable.

Si l'astable et le monostable constituent les montages de base du 555, la structure du circuit autorise de nombreuses applications différentes dans tous les montages de commutation.

CHAPITRE 8

CIRCUITS INTÉGRÉS LOGIQUES

L'électronique logique (ou numérique) a acquis une place de plus en plus importante grâce à ses nombreux avantages. L'étude des montages utilisant des circuits logiques est tout à fait différente de celle des circuits analogiques.

8.1 Généralités

La constitution interne d'un circuit intégré logique est identique à celle d'un circuit analogique : un grand nombre de transistors (bipolaires ou MOS) et de résistances placés sur une même pastille de silicium. Par contre, l'information traitée par ces deux types de circuits ne se présente pas sous la même forme. Pour les montages analogiques, l'information est portée par la valeur instantanée d'un signal, tension ou intensité. Les circuits logiques utilisent un signal binaire, c'est-à-dire constitué de seulement deux niveaux, auxquels on attribue une variable 0 ou 1. La valeur exacte du niveau de tension n'a aucune importance : l'état 0 ou 1 est attribué pour toute une fourchette de niveaux. Les différentes opérations que l'on effectue sur les variables binaires constituent l'algèbre de Boole.

La technique numérique présente de nombreux avantages. Si un parasite ou un bruit se superpose à un signal analogique, l'information est faussée. Par contre, si ces mêmes perturbations se superposent à un niveau logique, l'information 0 ou 1 n'est pas modifiée, à condition que la tension reste dans la fourchette autorisée. Les circuits logiques sont d'emploi très simple : il suffit de suivre un

certain nombre de règles élémentaires pour assembler un grand nombre de composants et réaliser des montages complexes. La mise au point est pratiquement inexistante. Le coût des circuits intégrés numériques est particulièrement bas. Certaines fonctions, difficiles à réaliser en technique analogique (comme la mise en mémoire) sont aisées si l'on utilise des variables binaires. Le développement des circuits programmés a encore accru cette importance de l'électronique numérique.

Les circuits logiques sont regroupés en familles. Dans un montage analogique, il faut étudier dans chaque cas l'adaptation d'un circuit à un autre. Pour les circuits logiques d'une même famille, aucun problème ne se pose : on peut relier un certain nombre d'entrées de circuits (précisé par le constructeur) sur une sortie sans avoir à étudier le problème. La conception d'un système logique se révèle alors particulièrement simple car il suffit de réaliser la fonction souhaitée à l'aide d'un certain nombre de boîtiers sans se préoccuper des problèmes électriques. C'est en quelque sorte un jeu de construction dont les différents éléments sont prévus pour s'adapter les uns aux autres.

Différentes familles logiques sont disponibles. La première, celle qui a permis le développement énorme des circuits numériques, est la famille TTL (*transistor-transistor-logic*). Ces circuits sont constitués de transistors bipolaires. Les performances sont cependant médiocres : ces composants sont assez rapides, mais consomment beaucoup. En conséquence, on ne peut pas concevoir de systèmes complexes qui posent tout de suite un problème d'alimentation. De ce fait, cette famille n'est plus utilisée aujourd'hui, mais on la rencontre encore dans des montages un peu anciens. La deuxième famille à avoir eu un développement important est la famille CMOS (*complementary MOS*) qui ne fait appel qu'à des transistors MOS. À l'inverse de la précédente, cette famille est lente, mais consomme peu. Les constructeurs ont cherché à améliorer les performances des deux types de circuits. Ainsi est apparue la famille TTL LS. C'est une version de la famille TTL qui consomme nettement moins, mais cependant plus que la famille CMOS. Depuis quelques années sont apparues de nouvelles familles qui apportent

des progrès notables par rapport à leurs ancêtres. En particulier, les familles CMOS rapides présentent tous les avantages des circuits précédents : la faible consommation de la CMOS et la rapidité de la TTL LS. Comme de plus leur prix est comparable à celui des familles plus anciennes, elles devraient rapidement les supplanter.

Les circuits intégrés logiques se présentent dans des boîtiers DIL en plastique. La référence indique la famille et la fonction réalisée. La plupart des circuits utilisent une numérotation commençant par 74. Les deux chiffres qui suivent indiquent la nature du circuit : 7400 est un quadruple NAND, 7404 renferme six inverseurs, etc. La famille apparaît par une ou deux lettres ajoutées : 7400 est un circuit TTL, 74C00 un circuit CMOS, 74LS00 un circuit TTLLS et 74HC00 un circuit CMOS rapide… Cependant, la principale famille CMOS classique utilise un autre type de numérotation. Les références commencent par 40 ou 45. Le boîtier qui contient six inverseurs s'appelle par exemple 4069. Les brochages sont communs pour les circuits numérotés 74XX, mais sont différents pour la série 40XX. Les familles CMOS rapides reprennent des circuits CMOS qui n'existent pas en TTL. Dans ce cas, la numérotation est 74HC40XX. Par exemple, le circuit 74HC4046 est une boucle à verrouillage de phase qui assure la même fonction que le circuit CMOS référencé 4046. Enfin, comme pour les circuits intégrés analogiques, les numéros sont accompagnés d'un préfixe propre à chaque constructeur et d'un suffixe qui indique la gamme de température.

L'alimentation des circuits logiques dépend de la famille à laquelle ils appartiennent. Les circuits TTL (ou TTLLS) sont prévus pour une alimentation de 5 V (4,75 à 5,25 V). Par contre, les circuits CMOS classiques (famille 40XX) autorisent une plage étendue de tension d'alimentation : 3 à 15 V. Les circuits CMOS rapides reviennent à des tensions plus faibles : 2 à 6 V pour la famille 74HCXX.

On peut classer les multiples rôles des circuits logiques en fonctions combinatoires et séquentielles. L'état de sortie d'un circuit combinatoire ne dépend que des niveaux présents sur ses entrées. Par contre, l'état de sortie d'un circuit séquentiel dépend à la fois des niveaux présents sur ses entrées et de l'état précédent de la sortie. Ces composants ont une certaine mémoire.

8.2 Circuits combinatoires

Une fonction combinatoire est définie par sa table de vérité. On y indique l'état de la sortie pour les différentes combinaisons possibles des niveaux d'entrée. Les *tableaux 8.1* à *8.6* donnent les tables de vérité des fonctions élémentaires : inversion (NON), ET, NAND (NON-ET), OU, NOR (NON-OU) et OU exclusif.

Tableau 8.1 – Table de vérité d'un inverseur.

E	*S*
0	1
1	0

Tableau 8.2 – Table de vérité d'un ET.

A	*B*	*S*
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

Tableau 8.3 – Table de vérité d'un NON-ET (NAND).

A	*B*	*S*
0	0	1
1	0	1
0	1	1
1	1	0

Tableau 8.4 – Table de vérité d'un OU.

A	*B*	*S*
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

Tableau 8.5 – Table de vérité d'un NON-OU (NOR).

A	*B*	*S*
0	0	1
1	0	0
0	1	0
1	1	0

Tableau 8.6 – Table de vérité d'un OU exclusif.

A	*B*	*S*
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	0

On a supposé que les circuits ont deux entrées (une pour l'inverseur). Dans certains cas particuliers, on rencontre des composants à plus de deux entrées (NAND à trois entrées par exemple). Sur les schémas, on représente les circuits logiques élémentaires soit par

leur symbole normalisé, soit par un symbole américain que l'on rencontre très souvent, surtout dans les documents datant de quelques années (*figure 8.1*).

Fonction	Symbole normalisé	Ancien symbole
Inverseur	1	
ET	&	
NAND	&	
OU	⩾ 1	
NOR	⩾ 1	
OU exclusif	= 1	

Figure 8.1 – Représentation des circuits logiques combinatoires.

Dans la pratique, on n'utilise pas des circuits intégrés réalisant chaque fonction élémentaire. On préfère par exemple réaliser un ET à l'aide d'un NAND et d'un inverseur (ou plutôt d'un autre NAND monté en inverseur).

Les boîtiers contenant toujours plusieurs circuits, on obtient ainsi une rationalisation de la conception des montages. On utilise surtout des NAND et des NOR (*figure 8.2*).

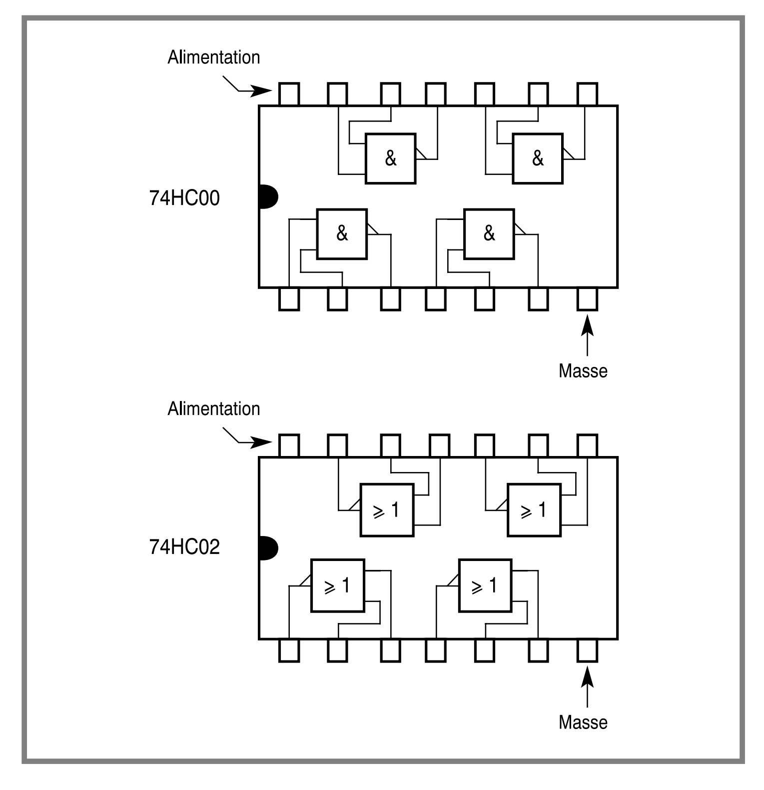


Figure 8.2 – Brochage des quadruples NAND et NOR à deux entrées en CMOS rapide (ou en TTL).

On trouve des circuits intégrés réalisant des fonctions combinatoires plus complexes comme le codage ou le décodage. Leur fonctionnement est simplement décrit par une table de vérité.

8.3 Circuits séquentiels

À la différence des fonctions combinatoires où seul l'état des entrées importe, la notion de temps intervient directement dans le fonctionnement des circuits séquentiels. Prenons l'exemple de la bascule JK (*figures 8.3 et 8.4*).

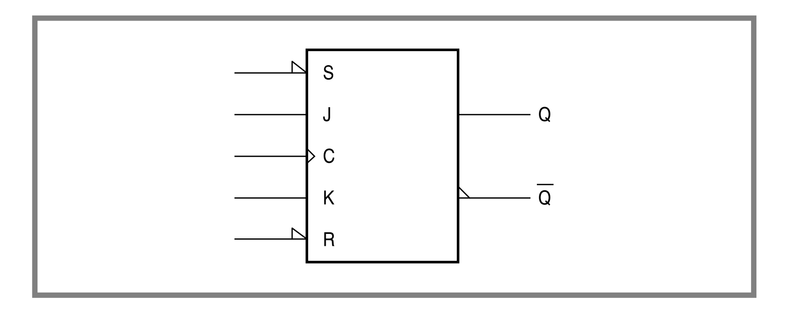


Figure 8.3 – Symbole normalisé d'une bascule JK.

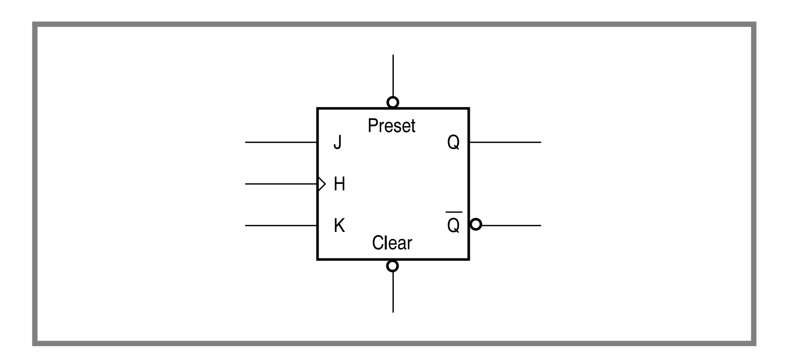


Figure 8.4 – Symbole courant d'une bascule JK.

Le circuit possède deux sorties complémentaires Q et $\overline{Q}$, une entrée d'horloge H, deux entrées asynchrones de prépositionnement (*clear* et *preset*) et deux entrées synchrones J et K. Le terme asynchrone signifie que l'entrée agit immédiatement, sans intervention du signal d'horloge, alors qu'une entrée synchrone n'agit que lors de l'arrivée d'un front d'horloge. L'action des entrées J et K est résumée dans le *tableau 8.7*, où Q est l'état de la sortie après validation par un front d'horloge.

Tableau 8.7 – Table d'une bascule JK.

J	*K*	*Q*
0	0	Inchangé
1	0	1
0	1	0
1	1	Basculement

Le fonctionnement peut être décrit par un diagramme temporel (*figure 8.5*).

Les bascules sont à la base de nombreuses fonctions séquentielles plus complexes : mémorisation, comptage… Ces fonctions sont réalisées par des circuits intégrés spécialisés. De très nombreux types de circuits sont disponibles dans chaque famille logique. Il n'est pas possible de les citer ici et il faut se reporter aux ouvrages plus spécialisés et aux notices des constructeurs.

8.4 Astables et monostables

Il s'agit là d'une catégorie particulière de montages qui associent composants logiques et analogiques. Nous avons déjà rencontré ces fonctions dans les chapitres précédents : astable à amplificateur

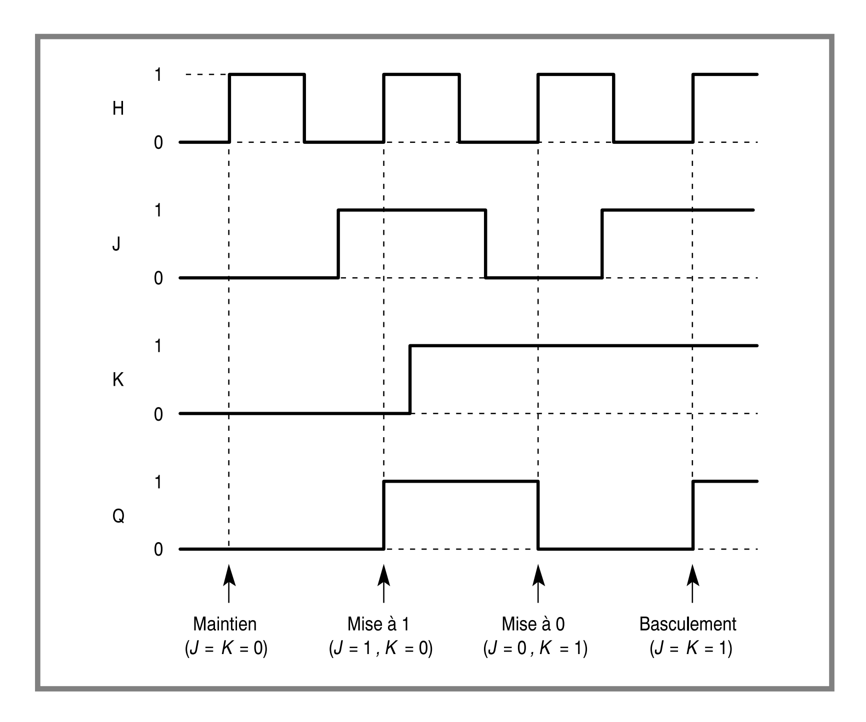


Figure 8.5 – Diagramme des temps de la bascule JK.

opérationnel ou à temporisateur 555, monostable utilisant un 555. Les circuits logiques élémentaires peuvent parfois remplacer les circuits intégrés analogiques dans ces fonctions de commutation. Par exemple, un astable peut être réalisé à partir de NAND CMOS montés en inverseurs (*figure 8.6*).

Les charges et décharges successives du condensateur associées aux basculements des inverseurs permettent d'obtenir en sortie un signal carré (*figure 8.7*).

La fréquence est donnée par la formule :

$$f = \frac{1}{2{,}2\,RC}$$

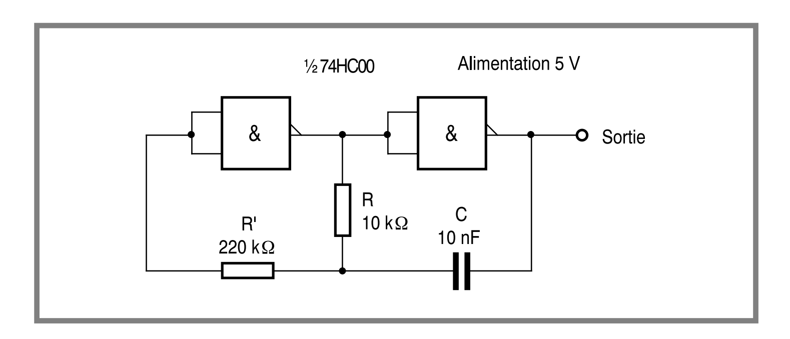


Figure 8.6 – Astable CMOS.

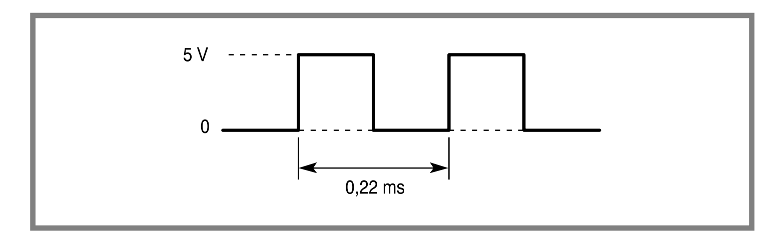


Figure 8.7 – Allure de la tension de sortie de l'astable CMOS.

Avec les valeurs du schéma, on calcule :

$$f = \frac{1}{2{,}2 \times 10^4 \times 10^{-8}} = 4\,550 \text{ Hz}$$

Les valeurs des éléments peuvent être choisies dans une large plage : de 2,7 kΩ à 2,7 MΩ pour *R* et de 47 pF à 10 µF pour *C*. La présence de *R'* n'est pas indispensable, mais elle permet d'éviter une influence des caractéristiques d'entrée des circuits. Il faut pour cela choisir *R'* au moins dix fois plus grande que *R*. Si cette résistance supplémentaire n'est pas utilisée, la formule de la fréquence n'est plus valable : le coefficient 2,2 est à remplacer par environ 1,6 à 1,8.

Le deuxième exemple est un circuit monostable (*figure 8.8*).

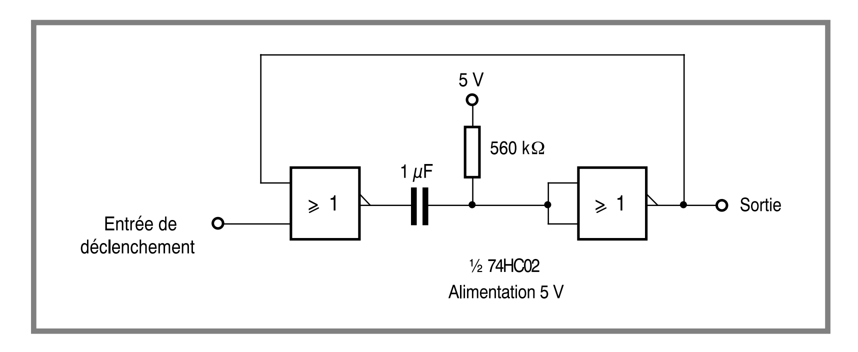


Figure 8.8 – Monostable CMOS.

Le déclenchement par une impulsion positive conduit à l'obtention d'une impulsion en sortie (*figure 8.9*).

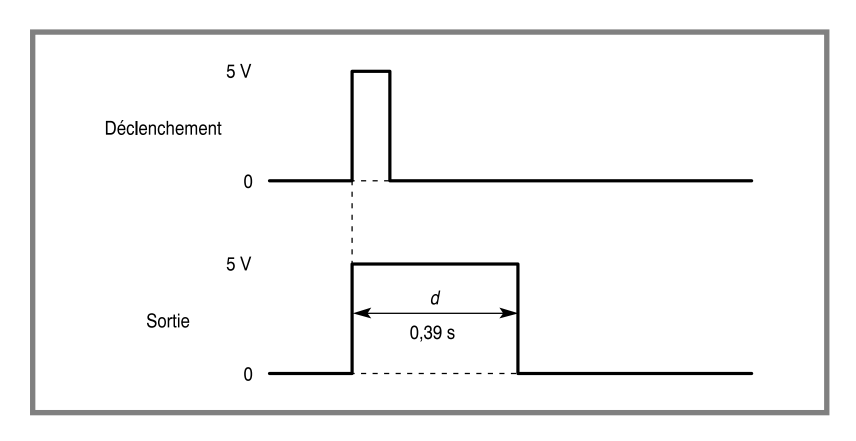


Figure 8.9 – Chronogrammes du monostable CMOS.

La durée du monostable est donnée par la formule :

$$d = 0{,}7\,RC$$

Avec les valeurs numériques, on a :

$$d = 0{,}7 \times 560 \times 10^{3} \times 10^{-6} = 0{,}39 \text{ s}$$

Il existe également dans chaque famille logique des circuits spécialisés astables ou monostables. Pour les utiliser, il suffit d'ajouter un condensateur et une résistance externe. Par exemple, dans la famille CMOS ordinaire, le circuit intégré 4047 permet de réaliser soit un astable (*figure 8.10*), soit un monostable (*figure 8.11*). Ce circuit permet de disposer de deux sorties complémentaires sur les bornes 10 et 11. Dans le cas du montage astable, le rapport cyclique est 50 % et la fréquence est fixée par la résistance R et le condensateur C :

$$f = \frac{1}{4{,}4RC}$$

Le déclenchement du monostable se fait par une impulsion vers le haut (*figure 8.12*) et sa durée est imposée par la résistance R et le condensateur C :

$$d = 2{,}48RC$$

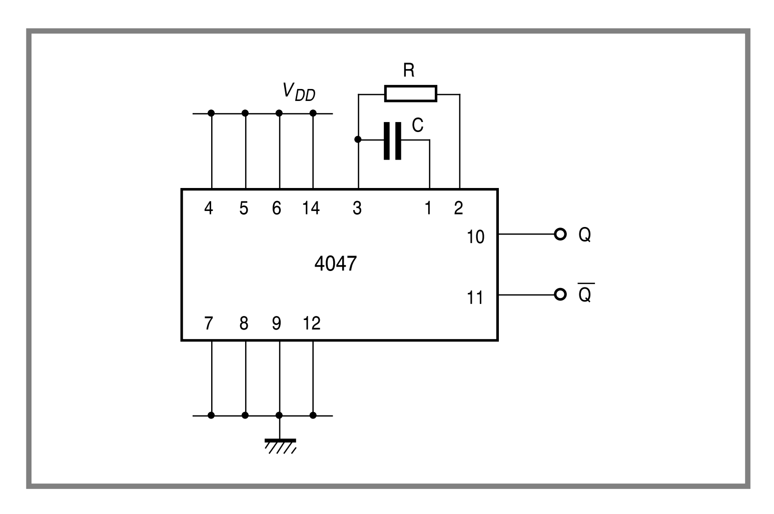


Figure 8.10 – Astable intégré.

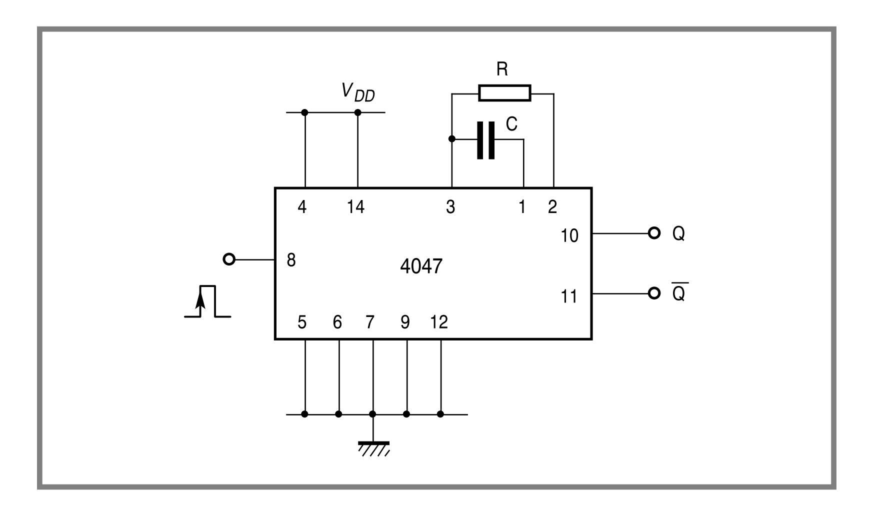


Figure 8.11 – Monostable intégré.

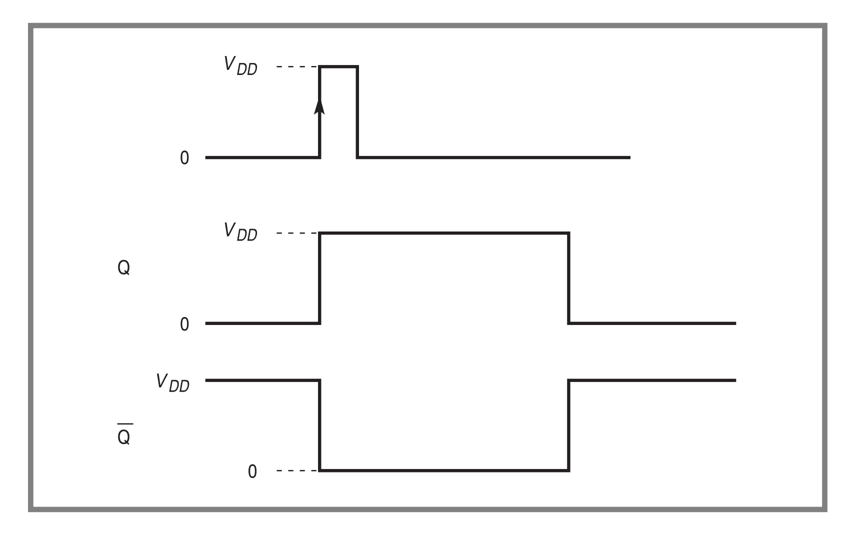


Figure 8.12 – Chronogrammes du monostable.

CHAPITRE 9

DOCUMENTATION SUR LES COMPOSANTS

Pour bien utiliser un composant électronique, il est indispensable de consulter sa notice détaillée pour bien évidemment connaître son brochage, mais aussi toutes ses caractéristiques techniques. Les publications des constructeurs permettent également d'avoir des idées de schémas pour différentes applications.

9.1 Diverses formes de documents

Les fabricants de composants éditent une littérature abondante sous des présentations diverses.

Documents sur papier

C'est la forme traditionnelle des informations techniques. On peut rencontrer :

– Le catalogue condensé (*short form*) : c'est une liste des composants fabriqués avec quelques paramètres permettant un premier choix. Les informations fournies ne sont cependant pas suffisantes pour utiliser le composant. C'est en fait un document plus commercial que technique.

– Le catalogue complet (*data book*) : c'est un recueil de notices détaillées (*data sheets*) des composants. Suivant l'étendue de sa gamme, un constructeur a un ou plusieurs catalogues, les composants étant dans ce dernier cas classés par types (transistors, circuits intégrés analogiques, circuits logiques TTL…). C'est ce

genre de document qu'il faut consulter pour utiliser un circuit à bon escient. On peut également y trouver des notes d'applications (*application notes*) qui fournissent des exemples de schémas accompagnés de quelques explications et de formules utiles pour la conception des montages. Des listes d'équivalences sont souvent données : elles permettent de remplacer un composant d'un constructeur par celui d'un autre en conservant des caractéristiques techniques identiques ou analogues.

– Le manuel technique (*handbook*) : il regroupe un certain nombre de notes d'applications traitant d'un thème donné. C'est une source d'informations très intéressante pour le concepteur de circuits électroniques. Les informations fournies sont en général très fiables : les schémas, élaborés par des spécialistes, ne comprennent que très rarement des erreurs. Le seul inconvénient est que les explications sont parfois succinctes et les calculs peu détaillés. Il reste donc une recherche à effectuer par l'utilisateur avant de pouvoir adapter un schéma en vue d'une application donnée.

– Les revues techniques : ce sont des documents publiés périodiquement par les grands constructeurs et donnant des informations sur les nouveautés, mais parfois aussi des articles qui approfondissent un point intéressant.

Documents informatiques

Les constructeurs abandonnent de plus en plus les catalogues sur papier, coûteux et encombrants, pour les remplacer par des documents informatiques. Un cédérom regroupe sous forme compacte les informations présentes dans plusieurs catalogues (notices techniques, schémas d'applications), mais aussi parfois des logiciels de conception (par exemple pour les filtres) ainsi que des modèles SPICE pour la simulation sur ordinateur. Seuls quelques fabricants à la gamme très étendue sont obligés d'utiliser plusieurs cédérom pour leur documentation. La présentation est souvent liée à celle du site Internet de la marque avec lequel des liens permettent une mise à jour permanente.

Sites Internet

Tous les constructeurs de composants électroniques possèdent leur site Internet qui ne se contente pas d'être une simple vitrine de la marque comme dans d'autres domaines, mais regroupe l'ensemble des informations techniques nécessaires à l'utilisateur. C'est aujourd'hui l'outil le plus performant pour trouver les renseignements recherchés : on dispose d'une information complète (parfois plus étendue que dans le cédérom correspondant), disponible immédiatement et gratuitement et en plus mise à jour régulièrement. Les adresses correspondantes sont assez stables, hormis dans le cas des inévitables changements de marque dus en général à des rachats de sociétés ou des regroupements. On peut ainsi citer quelques sites intéressants, la liste ne pouvant évidemment pas être exhaustive :

– Agilent Technologies : www.agilent.com
– Allegro : www.allegromicro.com
– Analog Devices : www.analog.com
– Bourns : www.bourns.com
– Fairchild : www.fairchildsemi.com
– Infineon : www.infineon.com
– International Rectifier : www.irf.com
– Intersil : www.intersil.com
– Linear Technology : www.linear.com
– Maxim : www.maxim-ic.com
– National Semiconductor : www.national.com
– Semelab : www.semelab.com
– STM : www.st.com
– Texas Instruments : www.ti.com
– Vishay : www.vishay.com

9.2 Contenu d'une notice technique

Le document le plus important pour l'utilisateur est la feuille de spécifications du composant qui regroupe l'ensemble des informations techniques intéressantes. Son importance varie suivant le type d'élément : de moins d'une page pour certains transistors à plusieurs dizaines de pages pour quelques circuits intégrés. Malgré d'inévitables variantes selon les constructeurs, ces notices présentent l'information suivant une structure à peu près commune, en particulier pour les circuits intégrés. On trouve, en général dans cet ordre :

– un petit paragraphe d'introduction donnant quelques caractéristiques essentielles du circuit. Il est destiné à être lu quand on parcourt le catalogue à la recherche d'un composant mais ne constitue pas une information technique complète. Il met plutôt en avant les points forts du composant ;

– le brochage du composant, c'est-à-dire le rôle des diverses connexions externes ;

– le schéma fonctionnel, pour certains circuits intégrés analogiques. Il décrit le fonctionnement du composant par des blocs qui correspondent à une fonction donnée. Il est intéressant dans certains cas pour l'étude des montages ;

– des explications nécessaires pour l'utilisation de certains circuits intégrés ;

– le schéma détaillé de la structure interne, pour certains circuits intégrés. Il est souvent de peu d'intérêt pour l'utilisateur ;

– les limites absolues de fonctionnement : elles sont particulièrement importantes pour l'utilisateur. Ce sont des valeurs à ne pas dépasser sous risque de destruction du composant ;

– les caractéristiques électriques : ce sont des indications des performances du composant données sous forme de valeurs numériques dans des tableaux ou de courbes. Ces données sont intéressantes pour le concepteur. Il faut bien distinguer les valeurs maximales ou minimales qui sont utiles pour respecter certaines contraintes exprimées sous forme d'inégalités et les valeurs typiques qui sont de simples ordres de grandeur ;

- des montages d'essais qui sont parfois fournis pour préciser les conditions de test de certains paramètres ;
- des schémas d'applications plus ou moins nombreux suivant les cas qui donnent des idées d'applications.

INDEX

A

B

C

D

E

F

G

H

N

O

P

Q

R

S

T


V


W


Z

048885 - (I) - (1,8) - OSB 100° - SCM - MPN
Dépôt légal de la 1ère édition : 1989
Dépôt légal : mars 2005 - N° 4751
Imprimerie CHIRAT - 42540 Saint-Just-la-Pendue

Imprimé en France

AIDE-MÉMOIRE DE L'INGÉNIEUR

Pierre Mayé

COMPOSANTS ÉLECTRONIQUES

***3e édition de* Connaître les composants électroniques**

Cet aide-mémoire décrit de manière simple et pratique les principales caractéristiques des composants de base, analogiques ou logiques, de l'électronique :

- leurs propriétés physiques et leurs principes de fonctionnement ;
- leurs caractéristiques technologiques ;
- leurs domaines d'utilisation à travers des applications concrètes.

Cette 3e édition, revue et actualisée, propose un nouveau chapitre traitant des thyristors et des triacs.

Avec près de 150 schémas, un panorama des différentes sources d'informations techniques et un index détaillé, l'ouvrage constitue un précieux outil de travail pour tous les électroniciens, débutants ou confirmés, ainsi que pour les techniciens non spécialistes du domaine.

PIERRE MAYÉ

est agrégé de physique et ingénieur en électronique et électromécanique. Il enseigne en BTS d'électronique à Arras. Il est l'auteur de plusieurs ouvrages spécialisés en électronique et électrotechnique.



L'USINE NOUVELLE



ISBN 2 10 048885 6

www.dunod.com